



TUGAS AKHIR - MO 141326

**ANALISIS *ULTIMATE LIMIT STATE* (ULS) PADA PIPA
BAWAH LAUT YANG MENGALAMI *FREESPAN***

Nonnia Dewi Permata Lomantoro

NRP. 04311440000067

Dosen Pembimbing :

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Ir. Handyanu, M.Sc., Ph.D.

Departemen Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

2018



FINAL PROJECT - MO 141326

ULTIMATE LIMIT STATE (ULS) ANALYSIS ON FREESPAN OF SUBSEA PIPELINE

Nonnia Dewi Permata Lomantoro

NRP. 04311440000067

Supervisors :

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Ir. Handyanu, M.Sc., Ph.D.

Department of Ocean Engineering

Faculty of Marine Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

2018

ANALISIS *ULTIMATE LIMIT STATE* (ULS) PADA PIPA BAWAH LAUT YANG MENGALAMI FREESPAN

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya**

Oleh :

NONNIA DEWI PERMATA LOMANTORO

NRP. 04311440000067

Disetujui oleh :

1. Ir. Imam Rochani, M.Sc.

(Pembimbing 1)

2. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

(Pembimbing 2)

3. Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

(Penguji 1)

4. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D

(Penguji 2)

5. Ir. Mas Murtedjo, M. Eng

(Penguji 3)

SURABAYA, JULI 2018

ANALISIS *ULTIMATE LIMIT STATE* (ULS) PADA PIPA BAWAH LAUT YANG MENGALAMI *FREESPAN*

Nama : Nonnia Dewi Permata Lomantoro
NRP : 04311440000067
Departemen : Teknik Kelautan ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Pipa bawah laut adalah salah satu cara untuk mendistribusikan fluida hasil pengeboran yang mempunyai umur operasi yang relatif panjang dengan biaya operasional dan perawatan yang rendah meskipun biaya pembangunan awalnya relatif mahal. Kondisi *seabed* yang tidak rata menyebabkan pipa mengalami *freespan*. Pipa dalam kondisi operasional harus mampu menahan gaya dari dalam pipa itu sendiri (*internal load*) dan gaya dari luar pipa (*eksternal load*). Kegagalan pada pipa sering terjadi karena beban yang terjadi pada pipa melebihi batas aman kekuatan materialnya. Cara untuk mengetahui batas maksimal kekuatan pipa bawah laut adalah dengan memeriksa kekuatan maksimalnya dengan cara menganalisis menggunakan pendekatan *Ultimate Limit State* (ULS). Kriteria analisis ULS telah diatur pada *codes* DNV RP F105: *Free Spanning Pipelines* 2006, sedangkan kriteria yang lebih detail dijelaskan pada *codes* DNV OS F101: *Submarine Pipeline System* 2013. Hasil panjang maksimal setelah *screening* frekuensi natural adalah 7 meter. Sedangkan panjang maksimal *span* kondisi ULS 7.5 meter. Kedua panjang *span* maksimal tersebut tidak menghasilkan tegangan ekuivalen melebihi tegangan *buckling* kritis. Sehingga dapat ditarik kesimpulan apabila panjang *freespan* maksimal yang diizinkan adalah 7 meter. Analisis tegangan ekuivalen menggunakan *software* menghasilkan tegangan ekuivalen yang mendekati perhitungan manualnya dengan *error* sebesar 3%.

Kata Kunci: Pipa bawah laut, *freespan*, ULS, *local buckling*, DNV.

ULTIMATE LIMIT STATE (ULS) ANALYSIS ON FREESPAN OF SUBSEA PIPELINE

Name : Nonnia Dewi Permata Lomantoro
Reg. Number : 04311440000067
Department : Ocean Engineering ITS
Supervisors : Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Subsea pipeline is one way to distribute drilling fluids that has a relatively long service life with low operational and maintenance costs even though the initial construction costs are relatively expensive. The uneven seabed condition causes the freespan. Pipes under operational conditions should be able to withstand forces from within the pipe itself (internal load) and force from outside the pipe (external load). Pipe failure often occurs because the load on the pipe exceeds the safe limit of material strength. The way to find out the maximum limit of subsea pipeline strength is to check its maximum strength by analyzing it using the Ultimate Limit State (ULS) approach. The ULS analysis criteria have been set in the DNV RP F105 codes: Free Spanning Pipelines 2006, with the more detailed criteria are described on the DNV OS F101 codes: Submarine Pipeline System 2013. The maximum result after the natural frequency screening is 7 meters. While the maximum length of the span condition of ULS 7.5 meters. The two maximum length spans do not produce the equivalent stress over the critical buckling stress. So it can be deduced if the maximum freespan length allowed is 7 meters. The equivalent stress analysis using the software produces an equivalent stress approaching the manual counting with an error of 3%.

Keywords: *Subsea pipeline, freespan, ULS, local buckling, DNV.*

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji syukur kami panjatkan atas kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah dan karunia—Nya kami dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Tugas Akhir ini berjudul “**ANALISIS *ULTIMATE LIMIT STATE* (ULS) PADA PIPA BAWAH LAUT YANG MENGALAMI *FREESPAN***”.

Laporan tugas akhir ini disusun guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Program Sarjana (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tugas Akhir ini membahas tentang cek ULS pada pipa bawah laut yang mengalami *freespan* dalam keadaan operasi dengan tujuan akhir mengetahui panjang *span* maksimum bentangan pipa tersebut.

Penulis menyadari dalam penulisan laporan ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik sangat diperlukan bagi penulis sebagai bahan penyempurnaan laporan selanjutnya. Penulis berharap semoga laporan ini bermanfaat bagi perkembangan teknologi di bidang rekayasa kelautan, bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Surabaya, Juli 2018

Nonnia Dewi P. Lomantoro

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini penulis tidak terlepas dari bantuan serta dorongan moral maupun material dari banyak pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Penulis sangat berterima kasih kepada semua pihak yang telah membantu. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Papa, Mama, Ibu, kakak dan adik saya yang menjadi motivasi penulis, penyelesaian tugas akhir ini merupakan salah satu bentuk dari do'a mereka yang terkabul.
2. Bapak Ir. Imam Rochani, M. Sc. dan Bapak Ir. Handayanu. M. Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang senantiasa membimbing dan mengarahkan pengerjaan penelitian ini.
3. Bapak Dr. Ir. Wahyudi selaku dosen wali penulis selama menempuh studi di Departemen Teknik Kelautan, FTK-ITS.
4. Staff pengajar Departemen Teknik Kelautan ITS yang berkontribusi menyumbangkan ilmunya sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan lancar.
5. Keluarga besar Maelstrom L-32 Teknik Kelautan 2014 khususnya Diar Eka, keluarga nyam - nyam, teman – teman OA dan para makmum yang memberi dukungan dan bantuan sehingga penelitian ini dapat terselesaikan tepat waktu.
6. Serta semua pihak yang telah turut membantu terselesaikannya penelitian ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Semoga seluruh bantuan yang telah diberikan kepada penulis mendapat balasan yang baik dari Allah SWT dan menjadi bekal di masa depan bagi penulis.

Surabaya, Juli 2018

Nonnia Dewi P. Lomantoro

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
DAFTAR ISTILAH	xiii
DAFTAR SINGKATAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Manfaat.....	2
1.5 Batasan Masalah.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Dasar Teori	6
2.2.1 Pipa Bawah Laut	6
2.2.2 <i>Freespan</i> pada Pipa Bawah Laut	10
2.2.3 Beban Lingkungan	12
2.2.4 Kriteria <i>Screening</i> Kelelahan	20
2.2.5 <i>Boundary Condition</i>	27
2.2.6 Frekuensi Natural Pipa.....	28
2.2.7 Interaksi Pipa dengan Tanah	30
2.2.8 <i>Bending Moment</i>	33
2.2.9 <i>Analisis Ultimate Limit State (ULS)</i>	37

2.2.10	Mitigasi Pipa Bawah Laut yang Mengalami <i>Freespan</i>	45
2.2.11	Metode Elemen Hingga	45
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		
3.1	Diagram Alir	47
3.2	Penjelasan Diagram Alir	48
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN		
4.1	Data Tugas Akhir	51
4.1.1	Data Desain Pipa Bawah Laut	51
4.1.2	Data Lingkungan.....	53
4.1.3	Data Tanah	54
4.2	Perhitungan Umum Pipa Bawah Laut.....	54
4.2.1	Properti Pipa.....	54
4.2.2	Berat Terendam Pipa.....	55
4.2.3	Tekanan pada Pipa	56
4.2.4	Massa Efektif Pipa	56
4.3	Arus dan Gelombang.....	56
4.3.1	Arus.....	56
4.3.2	Kecepatan Partikel Gelombang.....	57
4.4	Interaksi Pipa dengan Tanah	58
4.4.1	Kekakuan Tanah	58
4.5	Parameter Hidrodinamika.....	59
4.5.1	Parameter Stabilitas	59
4.5.2	<i>Current Flow Ratio</i>	59
4.5.3	<i>Reduce Velocity</i>	59
4.6	Analisis Struktural Pipa.....	60
4.6.1	<i>Concrete Stiffness Factor (CSF)</i>	60
4.6.2	Panjang <i>Freespan</i> Efektif.....	60
4.6.3	Gaya Aksial Efektif.....	62
4.6.4	<i>Critical Buckling Load</i>	63
4.6.5	<i>Static Deflection</i>	63
4.6.6	Frekuensi Natural Pipa.....	63
4.7	Screening Frekuensi Natural	65
4.8	Bending Moment.....	68
4.8.1	<i>Stress Range</i>	68

4.8.2	Environmental Stress Maksimal	69
4.8.3	Perhitungan <i>Bending Moment</i>	70
4.9	Cek ULS Menggunakan DNV-OS-F-101	71
4.9.1	<i>Denote Plastic Capacities</i>	71
4.9.2	Parameter pada Beban Kombinasi	71
4.9.3	Cek ULS	72
4.10	Tegangan Ekuivalen dan Tegangan Buckling Kritis	72
4.10.1	Tegangan Ekuivalen (Manual)	72
4.10.2	Tegangan Ekuivalen (<i>Software</i>)	73
4.10.3	Tegangan Buckling Kritis	75
4.10.4	Cek Tegangan	75
4.10.5	Panjang <i>Freespan</i> yang Diizinkan	76
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	77
5.2	Saran	77
DAFTAR PUSTAKA		79
LAMPIRAN		
BIODATA PENULIS		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem pipa bawah laut.....	6
Gambar 2.2 Tipe – tipe <i>span</i>	11
Gambar 2.3 Grafik untuk mendapatkan faktor reduksi.....	15
Gambar 2.4 Faktor koreksi aliran tidak steady	17
Gambar 2.5 Gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa	18
Gambar 2.6 <i>Vortex</i> dan aliran di belakang pipa	21
Gambar 2.7 Amplitudo respon <i>in-line</i> VIV terhadap V_R dan K_S	24
Gambar 2.8 <i>Respons model cross-flow</i>	25
Gambar 2.9 Grafik nilai <i>de-rating</i> untuk <i>yield stress</i>	41
Gambar 2.10 Ilustrasi kombinasi beban pada <i>freespan</i> pipa bawah laut	43
Gambar 2.11 Ilustrasi <i>hoop stress</i> pada pipa	43
Gambar 2.12 Ilustrasi tegangan longitudinal	44
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir.....	47
Gambar 4.1 Arah pembebanan.....	74
Gambar 4.2 Hasil Tegangan Ekuivalen	75

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kekasaran permukaan pipa	17
Tabel 2.2 Parameter kekasaran dasar laut	19
Tabel 2.3 <i>Safety factor</i> untuk parameter VIV	26
Tabel 2.4 <i>Safety factor</i> untuk <i>screening criteria</i>	27
Tabel 2.5 Koefisien kondisi batas	27
Tabel 2.6 <i>Modal soil damping ratio</i> untuk pasir.....	31
Tabel 2.7 <i>Modal soil damping ratio</i> untuk <i>clay</i>	31
Tabel 2.8 Faktor kekakuan dinamis dan statis untuk pasir	32
Tabel 2.9 Faktor kekakuan dinamis dan statis untuk <i>clay</i>	32
Tabel 2.10 Parameter geoteknik untuk tanah pasir	33
Tabel 2.11 Parameter geoteknik untuk tanah <i>clay</i>	33
Tabel 2.12 Faktor pembebanan untuk kombinasi beban.....	34
Tabel 2.13 Faktor kondisi beban	35
Tabel 2.14 Faktor tahanan material.....	40
Tabel 2.15 Faktor keamanan <i>resistance</i>	40
Tabel 2.16 Faktor kekuatan material.....	42
Tabel 4. 1 Data properti pipa bawah laut	51
Tabel 4. 2 Data <i>coating</i> pipa bawah laut.....	52
Tabel 4.3 Data operasional pipa bawah laut	52
Tabel 4.4 Data kedalaman perairan.....	52
Tabel 4.5 Data <i>water level</i>	53
Tabel 4.6 Data gelombang	53
Tabel 4.7 Data arus	53
Tabel 4.8 Data tanah	54
Tabel 4.9 Parameter properti pipa.....	54
Tabel 4.10 Hasil perhitungan umum pipa	55
Tabel 4.11 Hasil perhitungan berat terendam pipa dan parameternya.....	56
Tabel 4.12 Varian <i>spectral moment</i>	58
Tabel 4.13 Kecepatan partikel gelombang.....	58

Tabel 4.14 Kecepatan partikel gelombang setelah pengaruh faktor reduksi	58
Tabel 4.15 Iterasi panjang <i>freespan</i> efektif arah <i>in-line</i>	61
Tabel 4.16 Iterasi panjang <i>freespan</i> efektif arah <i>cross-flow</i>	61
Tabel 4.17 <i>Critical buckling load, static deflection</i> dan frekuensi natural arah <i>in-line</i>	64
Tabel 4.18 <i>Critical buckling load, static deflection</i> dan frekuensi natural arah <i>cross-flow</i>	64
Tabel 4.19 <i>Screening in-line</i>	66
Tabel 4.20 <i>Screening cross-flow</i>	67
Tabel 4.21 Momen <i>bending</i> arah vertikal	70
Tabel 4.22 <i>Denote plastic capacities</i>	71
Tabel 4.23 Input data pemodelan struktur.....	73
Tabel 4.24 Input pembebanan	74
Tabel 4.25 Cek tegangan.....	75
Tabel 4.26 Rangkuman panjang <i>freespan</i> maksimal	76

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A	PERHITUNGAN UMUM PIPA
LAMPIRAN B	ARUS DAN GELOMBANG
LAMPIRAN C	KEKAKUAN TANAH
LAMPIRAN D	<i>BOUNDARY CONDITION</i> DAN <i>SAFETY FACTOR</i>
LAMPIRAN E	PARAMETER HIDRODINAMIKA
LAMPIRAN F	PARAMETER UNTUK CEK ULS
LAMPIRAN G	<i>STRESS RANGE</i>
LAMPIRAN H	<i>BENDING MOMENT</i>
LAMPIRAN I	CEK ULS
LAMPIRAN J	TEGANGAN <i>VON-MISES</i> DAN PANJANG <i>SPAN</i> YANG DIIZINKAN
LAMPIRAN K	TEGANGAN EKVIVALEN MENGGUNAKAN <i>SOFTWARE</i>

DAFTAR ISTILAH

<i>Bending moment</i>	: momen yang menyebabkan <i>bending</i> pada struktur dan merupakan parameter utama untuk melakukan cek ULS
<i>Corrosion allowance</i>	: tebal tambahan dinding pipa untuk mengantisipasi korosi pipa selama beroperasi.
<i>Cross flow VIV</i>	: gerakan menggetar <i>pipeline</i> ke arah vertikal saat terkena beban arus.
<i>Freespan</i>	: suatu kondisi saat <i>pipeline</i> berada di dasar laut tanpa dukungan apapun.
Frekuensi natural	: frekuensi struktur dimana sistem berosilasi ketika sistem itu terganggu, frekuensi natural akan menunjukkan getaran struktur yang tergantung dari beberapa faktor seperti berat, kekakuan, dan panjang dari struktur tersebut.
<i>Gap</i>	: jarak antara permukaan tanah dasar laut dengan pipa saat kondisi <i>freespan</i> .
<i>In-line VIV</i>	: arah gerakan menggetar <i>pipeline</i> ke arah horizontal saat terkena beban arus.
<i>Local buckling</i>	: salah satu jenis <i>buckling</i> yang mempengaruhi bentuk penampang struktur (penampang <i>pipeline</i> tidak lagi berbentuk lingkaran sempurna).
<i>Buckling stress kritis</i>	: tegangan maksimal struktur sebelum terjadi tekukan atau <i>buckling</i> , biasanya digunakan sebagai batas tegangan yang diizinkan untuk masalah <i>buckling</i> .
<i>Steady</i>	: untuk aliran dengan kecepatan yang tidak berubah terhadap waktu
Tegangan <i>hoop</i>	: tegangan yang berada pada luasan penampang pipa dengan arah melingkar sesuai penampang tersebut.
<i>Trench</i>	: galian tanah pada lokasi rute pipa, sehingga <i>pipeline</i> akan terkubur penuh atau sebagian di dalam tanah.
ULS	: kondisi batas kekuatan pipa dalam menahan gaya internal maupun gaya eksternal yang terjadi.
VIV	: suatu permasalahan hidrodinamika yang mengakibatkan getaran pada pipa dan dapat menghasilkan aliran <i>vortex</i> (ulekan) ke arah struktur.

DAFTAR SINGKATAN

CD	<i>Chart Datum</i>
CF	<i>Cross Flow</i>
CSF	<i>Concrete Stiffness Factor</i>
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
HAT	<i>Highest Astronomical Tide</i>
IL	<i>In-Line</i>
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
KC	<i>Keulegan Carpenter</i>
LCC	<i>Load Control Condition</i>
MSL	<i>Mean Sea Level</i>
OS	<i>Offshore Standard</i>
PCS	<i>Pipeline Control System</i>
PE	<i>Polyethylene</i>
PP	<i>Polypropylene</i>
PSE	<i>Petro Storindo Energi</i>
RP	<i>Recommended Practice</i>
UC	<i>Unity Check</i>
ULS	<i>Ultimate Limit State</i>
VIV	<i>Vortex Induced Vibration</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Letak antara sumber dan fasilitas produksi maupun antar fasilitas produksi tidak selalu berdekatan, sehingga diperlukan sebuah struktur yang dapat mendistribusikan hasil pengeboran guna menjalankan proses produksi. Pendistribusian hasil pengeboran berupa minyak mentah atau gas alam pada umumnya dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan pipa bawah laut (*subsea pipeline*) dan secara curah (misal: kapal) (Soegiono, 2007). Pendistribusian hasil menggunakan *pipeline* dipilih sebagai salah satu alternatif karena faktor keamanannya lebih tinggi dibandingkan dengan pendistribusian hasil pengeboran secara curah. Selain itu pendistribusian fluida menggunakan *pipeline* juga mempunyai umur operasi yang relatif panjang dengan biaya operasional dan perawatan yang rendah meskipun biaya awal pembangunan yang relatif besar.

Pipa bawah laut dapat bekerja 24 jam sehari, 365 hari dalam setahun selama umur pipa yang bisa mencapai 30 tahun atau bahkan lebih (Soegiono, 2007). Diperlukan desain dan analisis yang cermat agar struktur tersebut sesuai dengan kondisi lingkungan, sehingga dapat diinstalasi dan beroperasi dengan baik sesuai fungsi dan periode operasinya. Kondisi *seabed* yang tidak selalu rata dapat menyebabkan *freespan*, yaitu keadaan pipa menggantung, dimana ada bagian pipa yang tidak ditumpu oleh permukaan *seabed*. Hal ini menyebabkan bagian pipa yang mengalami kondisi tersebut harus diberi perhatian khusus dalam proses desainnya. Apabila bentangan yang terjadi melebihi batas bentangan yang diizinkan, maka struktur akan mengalami kegagalan. Secara umum, kegagalan pada *subsea structure* adalah kegagalan statis yang diakibatkan oleh beban tunggal seperti beban *bending* yang besarnya melebihi tegangan *ultimate* dan kegagalan dinamis yang disebabkan oleh *fatigue* struktur akibat beban siklik.

Kondisi *Ultimate Limit State* (ULS) bukan menggambarkan sebuah kondisi fisik dari sebuah struktur, melainkan salah satu kondisi komputasional yang harus dipenuhi diantara kriteria lain dari segi kekuatan struktur. Penelitian tugas akhir

tentang analisis ULS terhadap pipa bawah laut pernah di teliti oleh Khanifudin (2015) dan Susetyo (2016). Pada penelitiannya, Khanifudin (2015) meneliti tentang ULS yang terjadi pada pipa bawah laut yang mengalami *freespan* dengan melakukan pengecekan terhadap *buckling* secara global, tanpa melakukan analisis *local buckling*. Susetyo (2016) melakukan penelitian terhadap kondisi ULS hingga analisis terhadap *local buckling* dengan *boundary condition* pada masing – masing ujung *freespan* adalah *pinned – pinned*. Penelitian ini akan mengkaji tentang analisis *Ultimate Limit State* (ULS) pada pipa bawah laut yang mengalami *freespan* untuk mengetahui batas kekuatan pipa menahan berbagai beban baik dari *internal* maupun *eksternal* struktur pipa bawah laut milik PT. X yang berlokasi di Madura. Analisis ULS yang dilakukan pada penelitian ini berdasarkan DNV-OS-F-101: *Submarine Pipeline System* (2013) dan akan divisualisasi kemudian dianalisis kembali menggunakan *software* ANSYS.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini antara lain:

1. Berapakah panjang *freespan* maksimal yang diizinkan agar tidak terjadi *Vortex Induced Vibration* (VIV)?
2. Berapakah panjang *span* yang diizinkan sesuai dengan analisis *Ultimate Limit State* (ULS)?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini antara lain:

1. Menghitung panjang *freespan* efektif agar tidak terjadi *Vortex Induced Vibration* (VIV).
2. Menghitung panjang *span* yang diizinkan sesuai dengan analisis *Ultimate Limit State* (ULS).

1.4 Manfaat

Manfaat dari penelitian pada tugas akhir ini adalah untuk mengetahui panjang *span* yang memenuhi kriteria *screening* kelelahan dan panjang *span* yang diizinkan berdasarkan kriteria ULS yang ada pada *codes* DNV RP F-105: *Free Spanning Pipelines* (2006) dan DNV OS F-101: *Submarine Pipeline System* (2013).

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam Tugas Akhir ini antara lain:

1. Jenis *span* yang ditinjau adalah *span* tunggal.
2. Tidak dilakukan analisis kelelahan.
3. Tumpuan pada masing – masing ujung *freespan* pipa adalah *pinned – pinned*.
4. Aliran fluida di dalam pipa adalah aliran *steady*.
5. *Marine growth* diabaikan.
6. Jaringan pipa bawah laut yang dianalisis adalah jaringan pipa milik PT. X yang berlokasi di Madura.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini terdiri atas lima bab yaitu sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Menjelaskan beberapa hal tentang penelitian dalam tugas akhir, yaitu masalah yang timbul sehubungan dengan kondisi yang melatarbelakangi penelitian sehingga penting untuk dilakukan, perumusan masalah yang perlu dijawab, tujuan yang digunakan untuk menjawab permasalahan yang diangkat, manfaat apa yang didapat dari dilakukannya penelitian tugas akhir, batasan dari penelitian tugas akhir, serta penjelasan dari sistematika laporan yang digunakan dalam tugas akhir.

BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Menjelaskan apa saja yang menjadi acuan dari penelitian tugas akhir ini serta dasar – dasar teori, persamaan – persamaan, serta *codes* yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini.

BAB III Metodologi Penelitian

Menjelaskan urutan pengerjaan yang dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan dan melakukan validasi dalam tugas akhir ini, beserta pembahasan data.

BAB IV Analisis Hasil dan Pembahasan

Menjelaskan tentang proses untuk menyelesaikan permasalahan dan hasil akhir penyelesaian dari permasalahan.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Menjelaskan tentang kesimpulan yang telah didapatkan dari hasil analisis pada tugas akhir ini dan saran – saran penulis sebagai pertimbangan dalam keperluan penelitian selanjutnya.

Daftar Pustaka

Berisi referensi yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada tugas akhir ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Ultimate Limit State (ULS) merupakan sebuah kondisi batas yang terkait dengan beban tunggal atau kondisi beban yang berlebihan, hal ini memungkinkan *pipeline* kehilangan integritas strukturalnya (Bai dan Bai, 2014). Kondisi *freespan* sangat mempengaruhi kekuatan dan ketahanan *pipeline*, karena dapat menyebabkan struktur pipa kehilangan daya dukung *seabed* karena kondisi pipa yang menggantung bebas. Pada tugas akhir ini akan menganalisis tentang panjang efektif *freespan pipeline* awal dan panjang maksimal *freespan* yang diizinkan pada kondisi ULS melalui tahap *screening* kriteria kelelahan dan *screening* ULS (*local buckling*). Metode analisis yang dilakukan berdasarkan DNV-OS-F101 (2013) dan DNV-RP-F105 (2006) serta divisualisasikan dengan *software* ANSYS.

Analisis *local buckling* pernah dilakukan oleh Dong dkk (2015), penelitian dilakukan dengan memperhatikan umur operasi struktur *pipeline*, respon struktur terhadap beban *vortex shedding*, *effective axial force*, gravitasi dan *bouyancy* yang divariasikan dengan panjang *freespan*. Analisis dilakukan secara numeris dan teoritis berdasarkan kriteria ULS yang dijelaskan pada DNV OS-F101. Penelitian tentang *local buckling* juga diteliti oleh Selker (2013), penelitian dilakukan terhadap *ring* dan pipa bawah laut yang telah mengalami *local buckling collapse* untuk mengetahui perilaku struktur yang dianalisis secara analitis dan dengan bantuan *software* FEA.

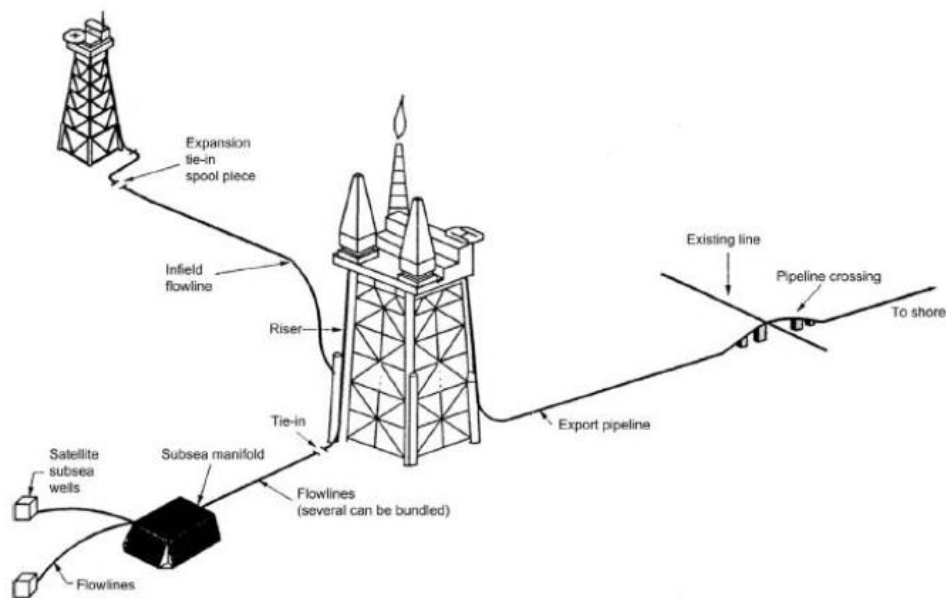
Pada tugas akhir sebelumnya penelitian terhadap ULS *pipeline* yang mengalami *freespan* pernah dilakukan oleh Khanifudin (2015) dan Susetyo (2016). Khanifudin (2015) pada penelitiannya melakukan analisis secara statis untuk mendapatkan panjang *freespan* efektif. Pengecekan terhadap *buckling* hanya dilakukan secara global, kemudian dianalisis kembali batas tegangan *ultimate* struktur pipa menggunakan metode *incremental load* yang dilakukan berdasarkan *codes* ABS 2005. Pada penelitiannya, Susetyo (2016) meneliti tentang *local buckling pipeline* di Sangatta, Kalimantan Timur yang mengalami *freespan* secara

statis dan dinamis. Analisis dilakukan untuk mengetahui panjang *freespan* maksimal yang diizinkan dengan metode perhitungan manual dan pemodelan dengan *software* FEM sebagai perbandingan dan visualisasi tegangan *von-mises*.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Pipa Bawah Laut

Pipeline merupakan bagian dari suatu jaringan pipa bawah laut yang biasanya disebut dengan *subsea flowlines*. *Pipeline* dari fasilitas proses menuju darat disebut *export pipelines*, sedangkan *pipeline* dari *platform* ke peralatan bawah laut untuk mengirimkan air atau *inhibitor* kimia disebut *water injection* atau *chemical flowlines* (Bai dan Bai, 2014).



Gambar 2. 1 Sistem pipa bawah laut

(Sumber: Bai dan Bai, 2014)

Langkah awal dalam mendesain suatu jaringan pipa bawah laut adalah melakukan pemilihan rute yang akan dilewati oleh jalur pipa tersebut (*routing*). Berikut adalah faktor yang harus dipertimbangkan untuk melakukan *routing* antara lain:

1. Memilih rute yang memiliki jarak paling pendek, berkaitan dengan efisiensi dari segi biaya produksi dan instalasi.
2. Rute yang dipilih harus memudahkan proses instalasi sehingga mampu mempercepat pekerjaan.

3. Memiliki resiko bahaya yang paling kecil.
4. Menghindari jalur pipa yang tidak tertumpu ketika diletakkan di dasar laut (*freespan*).

Langkah berikutnya adalah menghitung diameter, ketebalan dan material pipa yang sesuai. Diameter pipa ditentukan berdasarkan kapasitas aliran yang diinginkan. Sedangkan jenis material pipa dipilih berdasarkan fluida yang mengalir di dalamnya, beban yang diterima pipa, temperatur dan mode kerusakan yang mungkin terjadi selama proses instalasi hingga operasi.

2.2.1.1 Perhitungan Umum Pipa Bawah Laut

Perhitungan umum pipa bawah laut merupakan dasar untuk melakukan analisis lebih lanjut terhadap pipa bawah laut. Perhitungan umum ini meliputi properti pipa, berat setiap lapisan pipa, *gravity* dan *buoyancy*, berat terendam pipa dan massa efektif pipa.

1. Properti Pipa

a. Tebal dinding pipa (t_2)

Tebal dinding pipa yang dimaksud adalah ketebalan pipa tanpa ada tambahan perlindungan korosi. Tebal pipa ini digunakan untuk melakukan analisis kegagalan yang dipengaruhi oleh kondisi beban ekstrim dan pertimbangan kondisi operasi pipa (DNV-OS-F101, 2013).

$$t_2 = t_{nom} - t_{corr} \quad (2.1)$$

t_{nom} : tebal nominal dinding pipa (m)

t_{corr} : tebal toleransi terhadap korosi (m)

b. Diameter luar total pipa

Diameter luar total pipa merupakan diameter pipa secara keseluruhan termasuk diameter *steel*, *corrosion coating*, *concrete coating* dan *marine growth*.

$$D_t = D_0 + 2t_{cc} + 2t_{wc} + 2t_{mar} \quad (2.2)$$

D_t : diameter luar total pipa (m)

D_0 : diameter luar *steel* (m)

t_{cc} : tebal *corrosion coating* (m)

t_{wc} : tebal *concrete coating* (m)

t_{mar} : tebal *marine growth* (m)

c. Diameter total pipa tanpa *marine growth*

Untuk diameter tanpa *marine growth*, persamaannya hampir sama dengan diameter total sebelumnya, hanya saja tidak ditambah dengan tebal dari *marine growth*.

$$D_{tm} = D_0 + 2t_{cc} + 2t_{wc} \quad (2.3)$$

D_{tm} : diameter total pipa tanpa *marine growth* (m)

d. Diameter dalam pipa

Diameter dalam pipa merupakan diameter maksimal yang dapat dilewati oleh fluida yang dialirkan didalamnya.

$$D_i = D_0 - 2(t_{nom} - t_{int}) \quad (2.4)$$

D_i : diameter dalam pipa (m)

t_2 : tebal dinding pipa (m)

e. Diameter *concrete*

$$D_c = D_0 + 2t_{cc} + 2t_{wc} \quad (2.5)$$

D_c : diameter *concrete* (m)

f. Diameter *corrosion coating*

$$D_{cc} = D_0 + 2t_{cc} \quad (2.6)$$

g. Momen inersia dari *steel* pipa

Momen inersia dari *steel* pipa merupakan kelembaman *steel* untuk berputar pada porosnya.

$$I_{steel} = \pi \frac{D_0^4 - (D_i)^4}{64} \quad (2.7)$$

I_{steel} : momen inersia *steel* (m^4)

h. Momen inersia dari *concrete* pipa

$$I_{conc} = \pi \frac{D_c^4 - (D_c - 2t_{wc})^4}{64} \quad (2.8)$$

I_{conc} : momen inersia *concrete* (m^4)

i. *Internal cross section area* pipa

$$A_i = \frac{\pi}{4} (D_i)^2 \quad (2.9)$$

A_i : *Internal cross section area* pipa (m^2)

j. *Cross section area* pipa

$$A_s = \frac{\pi}{4} [D_0^2 - (D_i)^2] \quad (2.10)$$

A_s : Cross section area pipa (m^2)

2. Massa Efektif Pipa

Massa efektif pipa menurut Bai dan Bai (2014) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$m_e = m_{str} + m_c + m_a \quad (2.11)$$

m_{str} : massa struktur termasuk *coating* (kg/m)

m_c : massa fluida di dalam pipa (kg/m)

m_a : massa tambah (kg/m)

a. Massa Struktur Pipa

Massa struktur pipa merupakan penjumlahan massa pipa ditambah dengan massa lapisan *corrosion coating* dan massa lapisan *concrete coating*.

$$m_{str} = m_{st} + m_{cc} + m_{wc} \quad (2.12)$$

m_{st} : massa pipa baja (kg/m)

$$m_{st} = A_{st} \cdot \rho_{st} \quad (2.13)$$

ρ_{st} : massa jenis baja (kg/m^3)

m_{cc} : massa lapisan *corrosion coating* (kg/m)

$$m_{cc} = \pi \frac{(D_{cc}^2 - D_0^2)}{4} \rho_{cc} \quad (2.14)$$

ρ_{cc} : massa jenis *corrosion coating* (kg/m^3)

m_{wc} : massa lapisan *concrete coating* (kg/m)

$$m_{wc} = \pi \frac{(D_{wc}^2 - D_0^2)}{4} \rho_{wc} \quad (2.15)$$

ρ_{wc} : massa jenis *concrete coating* (kg/m^3)

b. Massa Isi Pipa

$$m_c = A_i \cdot \rho_c \quad (2.16)$$

ρ_c : massa jenis isi pipa (kg/m^3)

c. Massa Tambah Pipa

$$m_a = \frac{\pi}{4} (D_t)^2 \cdot \rho_w \cdot C_a \quad (2.17)$$

ρ_w : massa jenis air laut (kg/m^3)

C_a : koefisien *added mass*

$$C_a = \begin{cases} 0.68 + \frac{1.6}{\left(1 + 5\left(\frac{e}{D_t}\right)\right)} & \text{untuk } \frac{e}{D_t} < 0.8 \\ 1 & \text{untuk } \frac{e}{D_t} \geq 0.8 \end{cases} \quad (2.18)$$

e : gap (m)

3. Berat Terendam Pipa

Berat pipa ketika berada di darat dan di dalam air berbeda, hal ini berhubungan dengan gaya gravitasi selama di daratan dan gaya angkat keatas (*buoyancy*) selama pipa berada di dalam air.

$$W_{sub} = (m_{st} + m_c + m_{cc} + m_{wc}) \cdot g - F_b \quad (2.19)$$

F_b : *buoyancy* per meter (N/m)

$$F_b = \frac{\pi}{4} (D_t)^2 \cdot \rho_w \cdot g \quad (2.20)$$

ρ_w : massa jenis air laut (kg/m³)

4. Tekanan internal dan eksternal pipa

a. Tekanan internal (P_i)

Menurut DNV-OS-F101 (2013), tekanan desain merupakan tekanan maksimal selama operasi normal pipa yang diizinkan sesuai *pipeline control system* (PCS). Tidak ada tekanan internal untuk kondisi instalasi.

b. Tekanan eksternal (P_e)

Tekanan eksternal pada pipa berupa tekanan hidrostatik selama terendam.

$$P_e = h_t \cdot g \cdot \rho_w \quad (2.21)$$

h_t : kedalaman perairan total (m), termasuk pertambahan karena pasang

$$h_t = d + T_{surge} \quad (2.22)$$

d : kedalaman perairan (m)

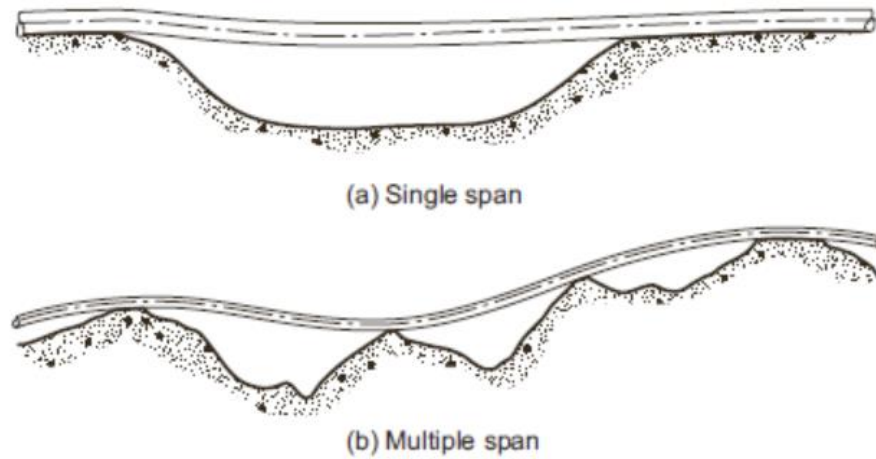
T_{surge} : ketinggian pasang air laut (m)

2.2.2 *Freespan* pada Pipa Bawah Laut

2.2.2.1 *Freespan*

Secara bahasa *span* adalah rentang. Dalam hubungannya dengan pipa bawah laut, *span* adalah rentang dimana terdapat bagian pipa bawah laut yang tidak tertumpu. *Span* pada pipa bawah laut dapat terjadi ketika kontak antara pipa bawah laut dan dasar laut hilang. Menurut DNV RP-F105 (2006), *freespan* dapat disebabkan oleh ketidakaturan dasar laut, perubahan topologi dasar laut seperti scouring, penumpu tambahan atau *rock beams* dan *strudel scours*. Jenis *span* pada *pipeline* tidak hanya bentangan tunggal (*single span*), namun juga

beberapa bentangan (*multi span*). *Multi span* yang berdekatan dapat saling berpengaruh atau saling berinteraksi (Bai dan Bai, 2014).



Gambar 2. 2 Tipe – tipe *span*

(Sumber: Bai dan Bai, 2014)

Menurut DNV-RP-F105 (2006), *free span* dapat dibagi menjadi dua kategori utama yaitu:

- 1) *Scouring* yang menyebabkan *free span* terjadi karena erosi dasar laut atau pembentukan dasar laut. Parameter *free span* dapat berubah seiring dengan waktu yaitu panjang *span*, *gap ratio* dan lain – lain.
- 2) *Free span* yang terjadi karena dasar laut yang tidak merata atau tidak teratur. *Freespan* tidak divariasikan oleh waktu kecuali ada perubahan signifikan dari tekanan dan temperatur.

2.2.2.2 Panjang *Freespan* Efektif

Menurut DNV RP-F105 (2006), panjang *span* adalah panjang dimana ada *gap* yang terjadi terus menerus, *gap* sendiri adalah jarak antara pipa dengan *seabed*. Sedangkan panjang *span* efektif adalah panjang idealis dari *span* dengan tumpuan yang mempunyai respon struktural yang sama dengan frekuensi natural sebagai *freespan* yang memiliki daya dukung tanah. Berdasarkan *codes* DNV RP-F105 (2006), persamaan untuk menghitung panjang efektif *span* adalah sebagai berikut:

$$\frac{L_{eff}}{L} = \frac{4.73}{-0.066\beta^2 + 1.02\beta + 0.63} \quad \text{untuk} \quad \beta \geq 2.7 \quad (2.23)$$

$$\frac{L_{eff}}{L} = \frac{4.73}{0.036\beta^2 + 0.61\beta + 1.0} \quad \text{untuk} \quad \beta < 2.7 \quad (2.24)$$

dengan,

$$\beta = \log_{10} \left(\frac{KL^4}{(1+CSF)EI_{steel}} \right) \quad (2.25)$$

- L_{eff} : panjang efektif *span* (m)
- L : panjang aktual *free span* (m)
- β : *relative soil stiffness parameter*
- K : *relevant soil stiffness* (vertikal atau horizontal, statis atau dinamis)
- CSF : faktor kekakuan *concrete*
- E : *Young's modulus* untuk *steel* (N/m²)
- I_{steel} : momen inersia dari *steel* (m⁴)

2.2.3 Beban Lingkungan

2.2.3.1 Gelombang

Gelombang adalah pergerakan naik dan turunnya air laut dengan arah tegak lurus dengan permukaan air laut yang dapat membentuk kurva. Sifat gelombang di laut adalah acak, dapat dilihat dari elevasi dan propagasinya yang tidak akan terulang urutan kejadian dan lokasi kejadiannya. Gelombang acak disusun oleh banyak gelombang sinusoidal dengan periode dan tingi gelombang yang berbeda – beda dan tersebar secara acak. Ukuran intensitas komponen gelombang acak umumnya dinyatakan dalam bentuk spektrum kepadatan amplitudo dan kepadatan energi gelombang atau yang biasa disingkat dengan spektrum gelombang. Gelombang laut acak dengan kurun waktu pendek dapat menggunakan spektrum JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) pada DNV-RP-F-105 (2006).

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right) \gamma^{\exp \left(-0.5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p} \right)^2 \right)} \quad (2.26)$$

- $S_{\eta\eta}$: spektra gelombang
- ω : frekuensi *angular* gelombang (rad/s)
- ω_p : frekuensi *angular* puncak gelombang (rad/s)
- α : konstanta Generalised Phillips

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega_p^4}{g^2} (1 - 0.287 \ln \gamma) \quad (2.27)$$

H_s : tinggi gelombang signifikan (m)

g : percepatan gravitasi (m/s^2)

γ : *peak-enhancement factor*

$$\gamma = \begin{cases} 5 & \varphi \leq 3.6 \\ \exp(5.75 - 1.15\varphi) & 3.6 < \varphi < 5 \\ 1 & \varphi \geq 5 \end{cases} \quad (2.28)$$

φ : fungsi distribusi

$$\varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \quad (2.29)$$

T_p : periode puncak gelombang (s)

σ : lebar spektral

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0.09 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (2.30)$$

Transformasi spektra gelombang menentukan *wave-induced velocity spectrum* pada level atau letak pipa pada dasar laut dan hal ini dapat dilakukan menggunakan teori gelombang orde satu (DNV-RP-F-105, 2006).

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) S_{\eta\eta}(\omega) \quad (2.31)$$

S_{UU} : spektra kecepatan gelombang pada *pipe level*

$G(\omega)$: fungsi transformasi frekuensi dari elevasi gelombang menjadi kecepatan arus

$$G(\omega) = \frac{\omega \cosh(k(D_t + e))}{\sinh(kd)} \quad (2.32)$$

d : kedalaman perairan (m)

D_t : diameter total pipa (m)

e : *gap* (m)

k : angka gelombang

Angka gelombang didapat dari iterasi menggunakan persamaan *transcendental*:

$$kd = \frac{\omega^2 d}{g} \coth(kd) \quad (2.33)$$

Momen spektra pada orde ke-n didefinisikan sebagai berikut:

$$M_n = \int_0^\infty \omega^n S_{UU}(\omega) d\omega \quad (2.34)$$

Kecepatan aliran gelombang signifikan pada kedalaman pipa:

$$U_s = 2\sqrt{M_0} \quad (2.35)$$

Mean zero up-crossing period dari aliran osilasi pada kedalaman pipa:

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \quad (2.36)$$

Arah dan sebaran gelombang dapat membentuk faktor reduksi pada kecepatan signifikan aliran. Kecepatan normal aliran yang mengenai pipa karena efek dari sebaran gelombang diformulasikan dengan (DNV-RP-F-105, 2006):

$$U_w = U_s R_D \quad (2.37)$$

U_w : kecepatan normal aliran pipa signifikan karena pengaruh faktor reduksi (m/s)

U_s : kecepatan arus dari gelombang signifikan (m/s)

R_D : faktor reduksi

$$R_D = \sqrt{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} w(\beta) \sin^2(\theta_{rel} - \beta) d\beta} \quad (2.38)$$

θ_{rel} : arah relatif antara arah *pipeline* dengan arah aliran arus (°)

w : fungsi sebaran energi gelombang

$$w(\beta) = \begin{cases} k_w \cos^s(\beta) & \text{untuk } |\beta| < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (2.39)$$

k_w : *normalisation constant*

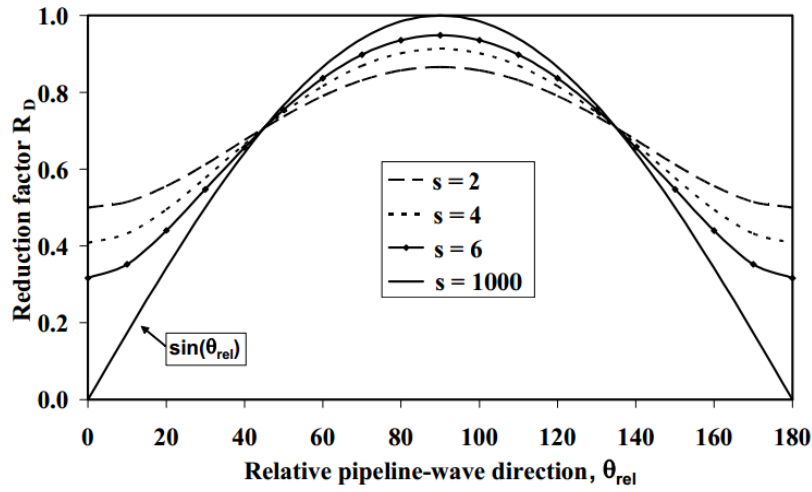
$$k_w = \sqrt{\frac{1}{\pi} \frac{\Gamma(1+\frac{s}{2})}{\Gamma(\frac{1}{2}+\frac{s}{2})}} \quad (2.40)$$

Γ : fungsi gamma

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt \quad (2.41)$$

s : *spreading parameter*

Grafik pada Gambar 2.3 dapat digunakan untuk memudahkan mendapatkan nilai faktor reduksi.



Gambar 2.3 Grafik untuk mendapatkan faktor reduksi
(Sumber: DNV-RP-F-105, 2006)

- Gaya Inersia

Partikel air pada gelombang akan menghasilkan beban siklis yang akan mengurangi atau menambah kecepatan air. Pipa akan merespon beban tersebut dengan memberikan gaya untuk menolak perubahan kecepatan partikel air yang disebut gaya inersia.

$$F_I = (\pi D_t) / 4 \rho_w C_M a_s \sin \theta \quad (2.42)$$

F_I : gaya inersia (N)

C_M : koefisien gaya inersia

a_s : percepatan signifikan partikel air yang mengenai pipa (m/s^2)

- Gaya Angkat (*Lift*)

Gaya angkat muncul karena ada aliran yang bekerja pada pipa menyebabkan terjadi perbedaan tekanan di bagian bawah dan atas pipa sehingga pipa terangkat. Perbedaan tekanan ini muncul karena ada jarak antara pipa dan dasar laut. hal tersebut menyebabkan tekanan tinggi di bawah pipa karena aliran menjadi lambat atau tidak ada, sedangkan di atas pipa aliran semakin cepat dan menyebabkan tekanan rendah.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_w D_t C_L (U_s \cos \theta + U_c)^2 \quad (2.43)$$

F_L : gaya angkat (N)

C_L : koefisien gaya angkat

- Gaya *Drag*

Gaya *drag* dipengaruhi oleh gelombang dan arus laut. Gaya *drag* menghasilkan tekanan yang tinggi di depan pipa dan tekanan yang rendah di belakang pipa, tetapi menimbulkan pusaran air di belakang pipa.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w D_t C_D U_{tot}^2 \quad (2.44)$$

F_D : gaya *drag* (N)

C_D : koefisien gaya *drag*

U_{tot} : kecepatan arus total (m/s)

Gaya *drag* merupakan beban yang mempengaruhi *static deflection* untuk arah *in-line*. Sebelum melakukan perhitungan gaya *drag*, diperlukan koefisien *drag* yang dihitung sesuai dengan DNV-RP-F-105 (2006).

$$C_D = C_D^0(k/D) \cdot \psi_{KC,\alpha}^{CD} \cdot \psi_{proxi}^{CD} \cdot \psi_{trench}^{CD} \cdot \psi_{VIV}^{CD} \quad (2.45)$$

$C_D^0(k/D)$: koefisien *drag* umum untuk aliran *steady*

$\psi_{KC,\alpha}^{CD}$: faktor koreksi aliran tidak *steady*

ψ_{proxi}^{CD} : faktor koreksi untuk lokasi pipa dekat dengan dasar laut

ψ_{trench}^{CD} : faktor koreksi karena pengaruh *trench*

ψ_{VIV}^{CD} : faktor tambahan selama pipa mengalami getaran *cross-flow*

a. Koefisien *drag* umum

Koefisien *drag* umum merupakan fungsi dari kekasaran permukaan pipa (k/D), sehingga bergantung pada lapisan terluar dari pipa. Nilai k didapat dari Tabel 2.1. Parameter untuk memilih persamaan koefisien *drag* umum yang tepat adalah perbandingan kekasaran permukaan pipa (k) dan diameter total pipa (D_t).

$$C_D^0(k/D) = \begin{cases} 0.65 & \text{untuk } \frac{k}{D_t} < 10^{-4} \\ 0.65 \left(\frac{29}{13} + \frac{4}{13} \log_{10} \left(\frac{k}{D_t} \right) \right) & \text{untuk } 10^{-4} < \frac{k}{D_t} < 10^{-2} \\ 1.05 & \text{untuk } \frac{k}{D_t} > 10^{-2} \end{cases} \quad (2.46)$$

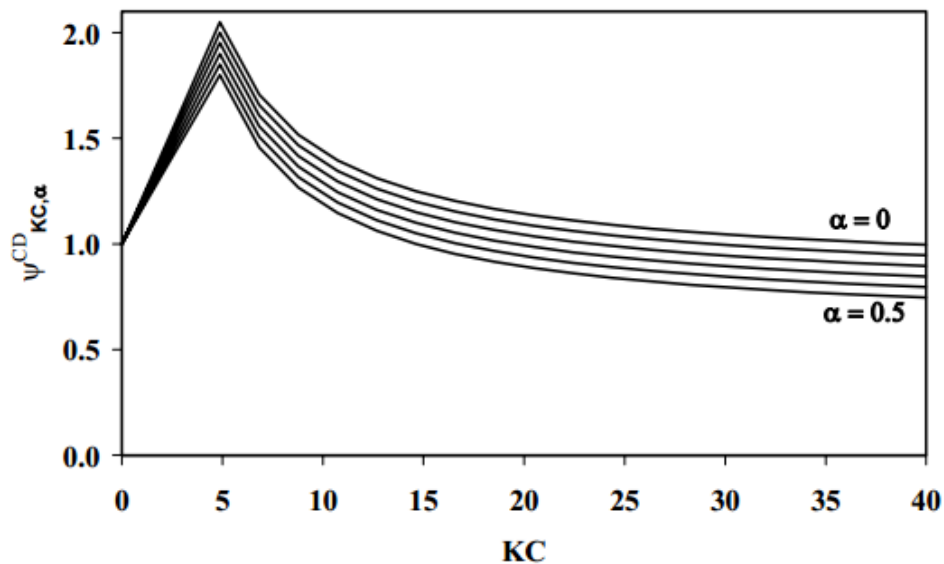
Tabel 2.1 Kekasaran permukaan pipa
(Sumber: DNV-RP-F-105, 2006)

Pipe surface	k [metres]
Steel, painted	10^{-6}
Steel, un-coated (not rusted)	10^{-5}
Concrete	1/300
Marine growth	1/200 \rightarrow 1/20

b. Faktor koreksi aliran tidak *steady*

Faktor ini merupakan pengaruh dari nilai Keulegan-Carpenter (KC) dan rasio aliran (α). Apabila nilai KC antara 5 hingga 40 dapat menggunakan persamaan 2.47, sedangkan apabila nilai KC < 5 dapat menggunakan grafik pada Gambar 2.4 kemudian harus dilakukan interpolasi. Untuk nilai KC > 40 dapat menggunakan persamaan 2.47 dengan mengganti nilai 6/KC menjadi 0.15.

$$\psi_{KC,\alpha}^{CD} = \begin{cases} 0.85 + \frac{6}{KC} - \frac{\alpha}{2} & \text{untuk } \alpha \leq 0.5 \\ 0.6 + \frac{6}{KC} & \text{untuk } \alpha > 0.5 \end{cases} \quad (2.47)$$



Gambar 2.4 Faktor koreksi aliran tidak steady (KC<5)
(Sumber: DNV-RP-F-105, 2006)

c. Faktor koreksi untuk lokasi pipa dekat dengan dasar laut

Persamaan untuk menghitung faktor koreksi karena lokasi pipa dekat dengan dasar laut adalah sebagai berikut (DNV-RP-F-105, 2006):

$$\psi_{proxi}^{CD} = \begin{cases} 0.9 + \frac{0.5}{\left(1 + 5\left(\frac{e}{D_t}\right)\right)} & \text{untuk } \frac{e}{D_t} < 0.8 \\ 1 & \text{untuk lainnya} \end{cases} \quad (2.48)$$

d. Faktor koreksi karena pengaruh *trench*

Faktor koreksi karena efek dari *trench* menurut DNV-RP-F-105, 2006 dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\psi_{trench}^{CD} = 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{\Delta}{D_t} \right) \quad (2.49)$$

Δ/D_t : kedalaman relatif *trench*

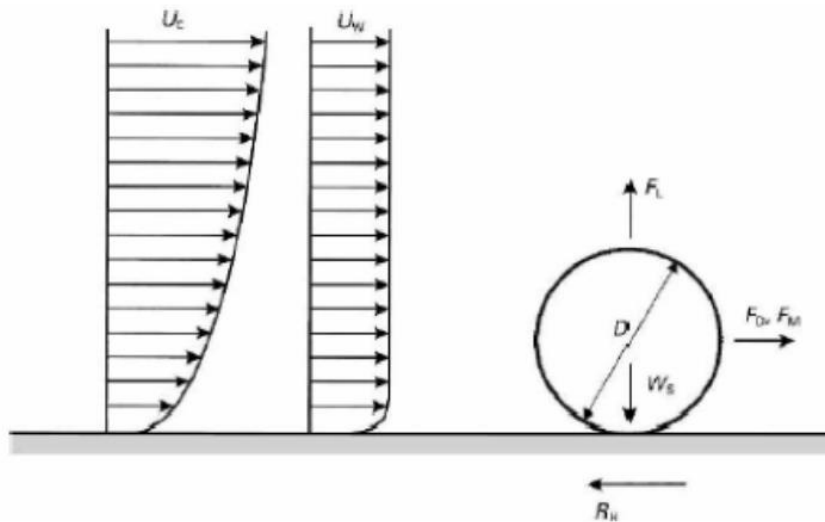
e. Faktor tambahan selama pipa mengalami getaran *cross-flow*

DNV-RP-F-105,2006 menyebutkan bahwa faktor tambahan karena pipa mengalami getaran *cross-flow* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\psi_{VIV}^{CD} = 1 + 1.043 \left(\sqrt{2} \frac{A_z}{D_t} \right)^{0.65} \quad (2.50)$$

A_z/D_t : amplitudo normal VIV arah *cross-flow*

Nilai A_z/D_t didapat menggunakan grafik pada Gambar 2.8 pada subbab *response model*.



Gambar 2.5 Gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa
(Sumber: Braestrup, 2005)

2.2.3.2 Arus

Selain gelombang, arus laut juga memberikan gaya terhadap struktur yang berada di laut. Aliran arus *steady* pada *freespan* dapat berasal dari arus pasang surut, arus pengaruh dari gelombang permukaan, kenaikan muka air laut akibat badai dan *density driven current*. Pada daerah *inner zone*, profil kecepatan arus didefinisikan dengan persamaan:

$$U_c = R_c U(z_r) \frac{(\ln(z) - \ln(z_0))}{(\ln(z_r) - \ln(z_0))} \quad (2.51)$$

R_c : faktor reduksi

z : elevasi diatas *seabed* (m)

$$z = e + \frac{D_t}{2} \quad (2.52)$$

e : *gap* (m)

D_t : diameter total pipa (m)

z_r : tinggi referensi (m)

$$z_r = D_0 + 2t_{wc} + t_{cc} \quad (2.53)$$

D_0 : diameter luar *steel* pipa (m)

t_{wc} : tebal *concrete* pipa (m)

t_{cc} : tebal *coating* pipa (m)

z_0 : parameter kekasaran *seabed* (m)

Nilai parameter kekasaran *seabed* didapatkan dari Tabel 2.2 berdasarkan jenis tanah tempat pipa meletak.

Tabel 2.2 Parameter kekasaran dasar laut
(Sumber: DNV-RP-F-105, 2006)

<i>Seabed</i>	<i>Roughness z_0 (m)</i>
Silt	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$
fine sand	$\approx 1 \cdot 10^{-5}$
Medium sand	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$
coarse sand	$\approx 1 \cdot 10^{-4}$
Gravel	$\approx 3 \cdot 10^{-4}$
Pebble	$\approx 2 \cdot 10^{-3}$
Cobble	$\approx 1 \cdot 10^{-2}$
Boulder	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$

2.2.4 Kriteria *Screening* Kelelahan

Kriteria *screening* kelelahan yang diakibatkan oleh *Vortex Induced Vibration* (VIV) dilakukan berdasarkan DNV RP-F105 (2006). Beban lingkungan yang diperhitungkan adalah beban gelombang yang dikombinasikan dengan kondisi pembebanan arus. Apabila salah satu dari kriteria *screening* berikut ini tidak terpenuhi, maka harus dilakukan analisis kelelahan pada *span* tersebut.

a. Frekuensi Natural Kondisi *In-Line*

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,100\text{tahun}}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D_t} \cdot \left(1 - \frac{L/D_t}{250}\right) \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (2.54)$$

$f_{n,IL}$: frekuensi natural *in-line* (Hz), Pers.

γ_{IL} : *safety factor (in-line)*

$U_{c,100 \text{ tahun}}$: periode ulang 100 tahun untuk arus laut (m/s)

$V_{R,onset}^{IL}$: *in-line onset value*

L : Panjang *free span* actual (m)

α : *current flow ratio*, Pers.

b. Frekuensi Natural Kondisi *Cros-Flow*

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100\text{tahun}} + U_{w,1 \text{ tahun}}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D_t} \quad (2.55)$$

$f_{n,CF}$: frekuensi natural *cross flow* (Hz).

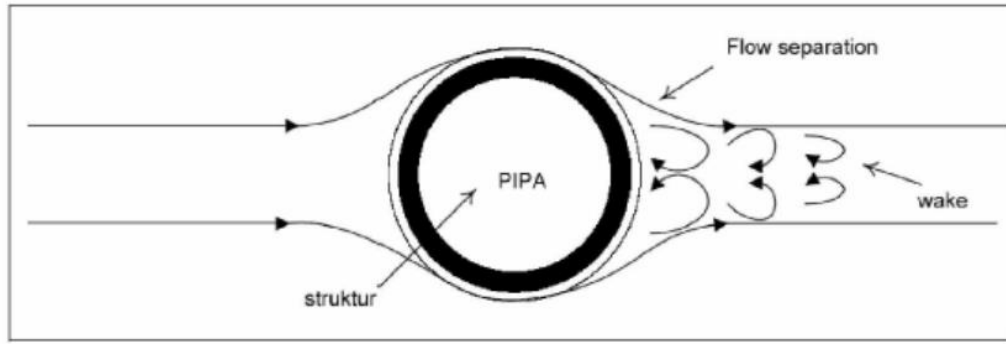
γ_{CF} : *safety factor (cross flow)*

$U_{w,1 \text{ tahun}}$: periode ulang signifikan 1 tahun untuk *wave induce velocity* (m/s)

$V_{R,onset}^{CF}$: *cross-flow onset value*

2.2.4.1 *Vortex Induced Vibration* (VIV)

Vortex Induced Vibration (VIV) merupakan getaran yang diakibatkan oleh fenomena dari interaksi antara fluida dan struktur pipa. *Vortex* merupakan suatu aliran dimana partikel fluidanya berotasi pada aliran rotasinya terhadap titik pusatnya. Pelepasan *vortex* disebut *vortex shedding*, yang mempunyai kecepatan transversal dan tangensialnya konstan dan bervariasi terhadap radiusnya (Indiyono, 1994).



Gambar 2.6 Vortex dan aliran di belakang pipa
(Sumber: Anastasio, 2007)

Akibat adanya *vortex shedding* ini, pipa yang dilaluinya akan mengalami tekanan lokal yang dapat menyebabkan pipa bergetar atau berosilasi pada frekuensi tertentu. Beberapa parameter VIV adalah sebagai berikut (DNV-RP-F105, 2006):

a. *Reduced velocity* (V_R)

$$V_R = \frac{U_c + U_w}{f_n D_t} \quad (2.56)$$

U_c : kecepatan normal arus pada pipa (m/s)

U_w : kecepatan aliran gelombang signifikan yang mengenai pipa (m/s)

f_n : frekuensi natural (Hz)

D_t : diameter luar pipa (m)

b. Keulegan-Carpenter *number* (KC)

$$KC = \frac{U_w}{f_w D_t} \quad (2.57)$$

f_w : frekuensi gelombang signifikan (Hz)

c. *Current flow velocity ratio* (α)

$$\alpha = \frac{U_{c,100\text{tahun}}}{U_{c,100\text{tahun}} + U_{w,1\text{tahun}}} \quad (2.58)$$

d. *Stability parameter* (K_s)

$$K_s = \frac{4\pi m_e \zeta_T}{\rho_w D_t^2} \quad (2.59)$$

m_e : massa efektif pipa per satuan panjang (kg/m)

ρ_w : massa jenis air (kg/m³)

ζ_T : total modal *damping ratio*

$$\zeta_T = \zeta_{str} + \zeta_h + \zeta_{soil} \quad (2.60)$$

- *Structural Damping* (ζ_{str})

Structural damping terjadi karena gesekan internal dari material pipa. Jika tidak ada informasi mengenai detail structural modal damping dapat diasumsikan dengan nilai berikut sesuai DNV-RP-F105 yaitu:

$$\zeta_{str} = 0,005 \quad (2.61)$$

Jika terdapat *concrete*, maka geser pada permukaan *concrete* dan *corrossion coating* dapat meningkatkan *damping* menjadi 0,01 – 0,02.

- *Hydrodynamic Damping* (ζ_h)

$$\zeta_h = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sigma_u g_D}{m_e f_n} g_c \left(\frac{U_C}{\sigma_u} \right) \lambda_1 \quad (2.62)$$

σ_u : standar deviasi

g_D : bagian gaya *drag*

g_c : fungsi koreksi untuk arus *steady*

m_e : massa efektif per satuan panjang (kg/m)

f_n : frekuensi natural (Hz)

λ_1 : *mode shape* faktor berat

Sesuai yang disarankan pada DNV RP-F105, nilai dari *damping* hidrodinamis adalah nol ($\zeta_h = 0$), dikarenakan faktor VIV untuk *lock-in regional*.

- *Soil Damping* (ζ_{soil})

Apabila tujuan analisis untuk *screening*, nilai dari *soil damping* dapat dimasukkan 0.01 ($\zeta_{soil} = 0,01$) sesuai pada DNV RP-F105 (2006).

Untuk meningkatkan keamanan, maka perlu diperhitungkan *safety factor* sesuai DNV RP-F105:

$$K_{sd} = \frac{K_s}{\gamma_k} \quad (2.63)$$

K_{sd} : parameter stabilitas dengan mempertimbangkan *safety factor*

γ_k : *safety factor* untuk parameter stabilitas

e. *Reynolds number* (Re)

$$Re = \frac{U_{tot} D_t}{\nu_u} \quad (2.64)$$

U_{tot} : kecepatan total aliran (m/s)

ν_u : viskositas kinematis air (m^2/s) = 1.5×10^{-6} (m^2/s)

f. *Vortex shedding frequency* (f_s)

Adanya arus di dasar laut dapat menyebabkan tegangan dinamis yang signifikan, jika interaksi struktur fluida (*vortex shedding*) dalam area *free span* dapat menyebabkan *pipeline* untuk berosilasi. Osilasi ini dapat menyebabkan kelelahan pada pipa, yang mana mengurangi umur pipa tersebut (Guo dkk, 2014).

$$f_s = S_t \frac{U_{tot}}{D_t} \quad (2.65)$$

S_t : *strouhal number* (silinder bulat = 0.2)

U_{tot} : kecepatan partikel air (m/s)

2.2.4.2 *Response Model*

a. *In-line response model*

Respons *in-line* pada *freespan pipeline* dalam kondisi arus dominan adalah berkaitan dengan salah satu dari *vortex shedding* bolak – balik atau simetris (DNV RP-F105, 2006).

- *Stress range* pada *in-line* VIV

$$S_{IL} = 2 \cdot A_{IL} \cdot (A_\gamma/D) \cdot \psi_{a,IL} \cdot \gamma_s \quad (2.66)$$

S_{IL} : *stress range in-line* (Pa)

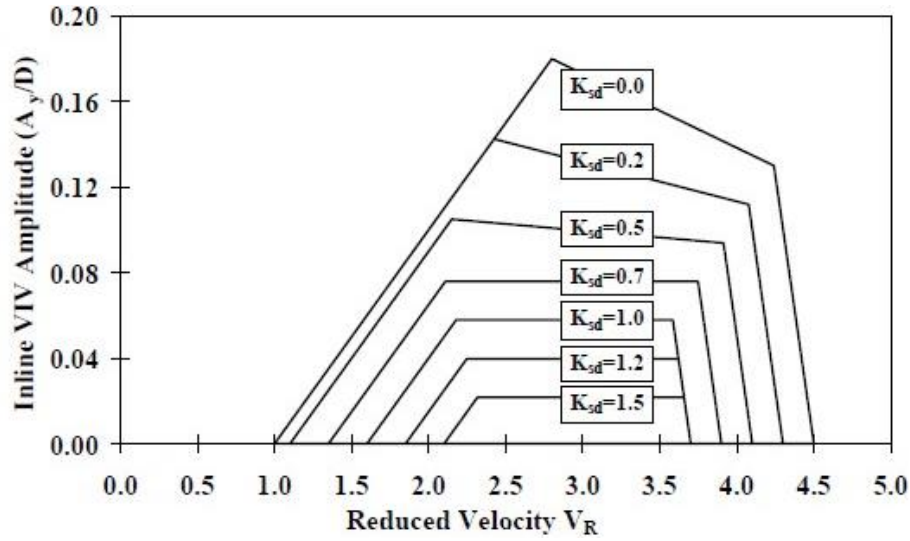
A_{IL} : *unit stress amplitude* (in-line) (Pa)

(A_γ/D) : *amplitude respons* maksimal *in-line* VIV

$\psi_{a,IL}$: faktor koreksi dari rasio aliran arus

γ_s : faktor keamanan untuk *stress range*

Nilai dari γ_s dapat dilihat dari Tabel 2.3 di bagian *safety factor*, sedangkan nilai (A_γ/D) dapat didapatkan dengan grafik di bawah ini yang merupakan fungsi dari V_R dan K_S :



Gambar 2.7 Amplitudo respon *in-line* VIV terhadap V_R dan K_S

(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

Nilai untuk faktor koreksi dari rasio aliran arus, didapatkan dengan persamaan berikut:

$$\psi_{\alpha,IL} \begin{cases} 0 & \text{untuk } \alpha < 0.5 \\ \frac{(\alpha-0.5)}{0.3} & \text{untuk } 0.5 < \alpha < 0.8 \\ 1 & \text{untuk } \alpha > 0.8 \end{cases} \quad (2.67)$$

- *Reduce velocity* untuk arah *in-line*

$$V_{R,onset}^{IL} = \left(\frac{1}{\gamma_{on,IL}} \right) \text{ untuk } K_{sd} \leq 0,4 \quad (2.68)$$

$$V_{R,onset}^{IL} = \left(\frac{0.6+K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} \right) \text{ untuk } 0,4 < K_{sd} < 1,6 \quad (2.69)$$

$$V_{R,onset}^{IL} = \left(\frac{2,2}{\gamma_{on,IL}} \right) \text{ untuk } K_{sd} \leq 1,6 \quad (2.70)$$

$V_{R,onset}^{IL}$: *reduce velocity in-line*

$\gamma_{on,IL}$: *safety factor* untuk *in-line*

K_{sd} : parameter stabilitas dengan sudah mempertimbangkan *safety factor*

b. *Cross-flow response model*

- *Stress Range cross flow VIV*

$$S_{CF} = 2 \cdot A_{CF} \cdot (A_z/D) \cdot R_k \cdot \gamma_s \quad (2.71)$$

S_{CF} : *stress range cross-flow VIV* (Pa)

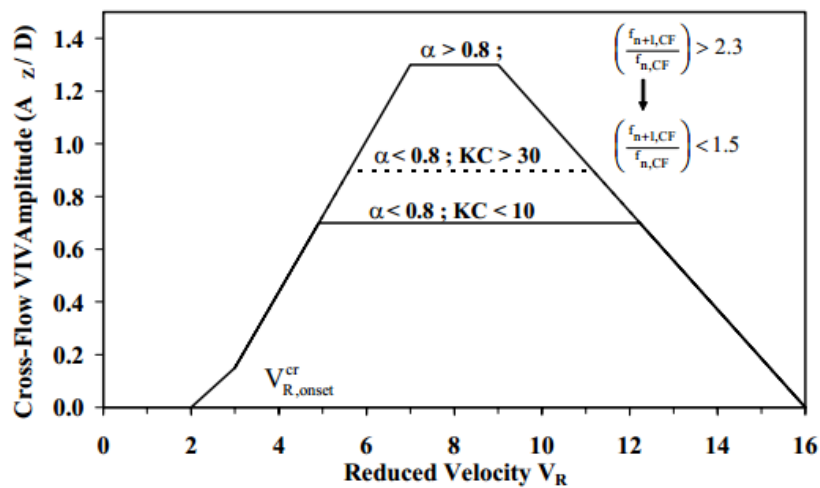
A_{CF} : *unit stress amplitude* (Pa)

(A_z/D) : *amplitudo cross-flow VIV*

R_k : *amplitude reduction factor untuk damping*

γ_s : *faktor keamanan untuk stress range*

Nilai (A_z/D) didapatkan dari grafik di bawah ini:



Gambar 2.8 *Respons model cross-flow*
(Sumber: DNV RP-F105, 2006)

Untuk mendapatkan nilai *amplitude reduction factor* untuk *damping*, dapat digunakan persamaan berikut sesuai DNV-RP-F105 (2006):

$$R_k = \begin{cases} 1 - 0,15K_{sd} & \text{untuk } K_{sd} \leq 4 \\ 3,2K_{sd}^{-1,5} & \text{untuk } K_{sd} > 4 \end{cases} \quad (2.72)$$

- *Reduce velocity untuk arah cross-flow*

$$V_{R,onset}^{CF} = \left(\frac{3\psi_{prox, onset} \psi_{trench, onset}}{\gamma_{on, CF}} \right) \quad (2.73)$$

$V_{R,onset}^{CF}$: *reduce velocity cross flow*

$\psi_{proxi,onset}$: faktor koreksi untuk *cross flow* dekat *seabed*

$$\psi_{proxi,onset} = \begin{cases} \frac{1}{5} \left(4 + 1,25 \frac{e}{D_t} \right) & \text{untuk } \frac{e}{D_t} < 0,8 \\ 1 & \text{untuk } \frac{e}{D_t} \geq 0,8 \end{cases} \quad (2.74)$$

$\psi_{trench,onset}$: *reduction factor* untuk *cross flow* karena pengaruh *trench*

$$\psi_{trench,onset} = 1 + 0,5 \frac{\Delta}{D_t} \text{ dengan } 0 \leq \frac{\Delta}{D_t} \leq 1 \quad (2.75)$$

$$\frac{\Delta}{D_t} = \frac{1,25 d_{trench-e}}{D_t} \quad (2.76)$$

$\gamma_{on,CF}$: *safety factor* untuk *cross flow*

- *Maximum* (unit diameter) *stress amplitude*

$$A_{IL/CF} = C_4 (1 + CSF) \frac{D_t (D_0 - t_{nom}) E}{L_{eff}^2} \quad (2.77)$$

$A_{IL/CF}$: *maximum* (unit diameter) *stress amplitude*

C_4 : *boundary condition*

D_0 : *outer steel diameter* (m)

t_{nom} : *tebal dinding pipa* (m)

2.2.4.3 Safety Factor

Sesuai dengan DNV-RP-F105 (2006), *safety factor* untuk persamaan yang ada pada subbab sebelumnya adalah sebagai berikut (Tabel 2.3 dan Tabel 2.4):

Tabel 2.3 *Safety factor* untuk parameter VIV
(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

<i>Safety factor</i>	<i>Safety Class</i>		
	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
η	1.0	0.5	0.25
γ_k	1.0	1.15	1.30
γ_s	1.3		
$\gamma_{on, IL}$	1.1		
$\gamma_{on, CF}$	1.2		

Tabel 2.4 *Safety factor untuk screening criteria*
(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

γ_{IL}	1.4
γ_{CF}	1.4

2.2.5 Boundary Condition

Nilai kondisi batas yang berada pada persamaan – persamaan sebelumnya (C_1 - C_6) terdapat pada **Tabel 2.** di bawah ini, dengan sebelumnya sudah menentukan *end condition* pada *freespan*. Menurut DNV RP-F105 (2006), *end condition* ini biasanya *fixed* atau *pinned* untuk analisis *freespan* tunggal. *Fixed-fixed* hanya digunakan jika telah melakukan pengamatan di lokasi pipa dengan ujungnya terdapat *support* yang sifatnya *fixed*. Selain *fixed-fixed* terdapat juga kondisi *pinned-pinned*. Kondisi batas ini sangat berpengaruh pada penentuan panjang *free span* maksimal yang diizinkan. Dalam melakukan penentuan ini tentu tidak mudah, perlu untuk memodelkannya dalam sebuah model FEM. Kondisi yang sepertinya *pinned-pinned* tidak sepenuhnya *pinned-pinned*, seperti contohnya pada *freespan* diantara 2 batu.

Tabel 2.5 Koefisien kondisi batas
(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

	Pinned-Pinned ²⁾	Fixed-Fixed ³⁾	Single span on seabed
C_1	1.57	3.56	3.56
C_2	1.0	4.0	4.0
C_3	0.8 ¹⁾	0.2 ¹⁾	0.4 ¹⁾
C_4	4.93	14.1	Shoulder: $14.1(L/L_{eff})^2$ Mid-span: 8.6
C_5	1/8	1/12	Shoulder: ⁴⁾ $\frac{1}{18(L_{eff}/L)^2 - 6}$ Mid-span: 1/24
C_6	5/384	1/384	1/384
1) Note that $C_3 = 0$ is normally assumed for in-line if the steady current is not accounted for. 2) For pinned-pinned boundary condition L_{eff} is to be replaced by L in the above expressions also for P_{cr} . 3) For fixed-fixed boundary conditions, $L_{eff}/L = 1$ per definition. 4) C_5 shall be calculated using the static soil stiffness in the L_{eff}/L calculation.			

Dari keterangan di bawah nilai kondisi batas $C_1 - C_6$, dapat dilihat bahwa pada nomor 2 dikatakan untuk kondisi batas *pinned-pinned*, L_{eff} (panjang *freespan* efektif) diganti dengan L (panjang aktual *freespan*) untuk beberapa persamaan di atasnya. Persaman tersebut adalah frekuensi natural, *static deflection*, *critical buckling load*.

2.2.6 Frekuensi Natural Pipa

Frekuensi natural ini merupakan suatu nilai yang harus didapatkan, karena hasil dari frekuensi natural ini akan digunakan untuk melakukan *screening* frekuensi natural sesuai dengan DNV-RP-F105 (2006). Persamaan untuk menghitung frekuensi natural kondisi *in-line* dan *cross-flow* adalah sebagai berikut:

$$f_n = C_1 \sqrt{1 + CSF} \sqrt{\frac{EI_{steel}}{m_e L_{eff}^4} \left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}} + C_3 \left(\frac{\delta}{D_t} \right)^2 \right)} \quad (2.78)$$

- $C_1 - C_3$: koefisien kondisi batas
- CSF : *concrete stiffness factor*
- E : *Young's modulus* untuk *steel* (Pa)
- I_{steel} : momen inersia untuk *steel* (m^4)
- m_e : massa efektif (kg/m)
- L_{eff} : panjang *span* efektif (m)
- S_{eff} : gaya aksial efektif (N)
- P_{cr} : *critical buckling load* (N)
- δ : *static deflection* (m)
- D_t : diameter luar pipa (m)

2.2.6.1 Concrete Stiffness Factor (CSF)

Coating pada pipa memiliki pengaruh pada beberapa parameter, diantaranya meningkatkan berat terendam, gaya *drag*, massa tambah atau *buoyancy* pipa. Efek lainnya adalah kekakuan dan kekuatan pipa.

$$CSF = k_c \left(\frac{E_c I_{conc}}{EI_{steel}} \right)^{0.75} \quad (2.79)$$

- k_c : *parameter for concrete stiffening (empirical parameter)*
- E_c : *Young's modulus* untuk *concrete* (Pa)

$$E_c = 10000 f_{cn}^{0.3} \quad (2.80)$$

f_{cn} : kekuatan konstruksi *concrete* (Pa)

E : *Young's modulus* untuk *steel* (Pa)

I_{steel} : momen inersia *steel* (m⁴)

I_{conc} : momen inersia *concrete* (m⁴)

Nilai k_c merupakan nilai empiris untuk deformasi atau selip dalam *coating corrosion* dan retak pada *concrete coating*. Sesuai DNV-RP-F105 (2006), nilai k_c tergantung pada *coating* yang digunakan, untuk *asphalt* nilai k_c adalah 0,33. Sedangkan untuk PP (*polypropylene*) / PE (*polyethylene*) *coating* nilainya 0,25.

2.2.6.2 Static Deflection

Apabila nilai *static deflection* tidak didapatkan dari survei atau perhitungan yang akurat, estimasi berikut dapat dilakukan sesuai DNV RP-F105 (2006):

$$\delta = C_6 \frac{q^4 L_{eff}}{EI(1+CSF)} \frac{1}{\left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}}\right)} \quad (2.81)$$

δ : *static deflection* (m)

C_6 : *boundary condition coefficient*

q : *deflection load per unit length* (N/m)

S_{eff} : gaya aksial efektif (N)

P_{cr} : *critical buckling load* (N)

Nilai *deflection load* (q) didapatkan dari beberapa perhitungan sebelumnya tergantung pada arah getaran pipa (*in-line* atau *cross-flow*). Sesuai dengan DNV-RP-F-105 (2006), untuk arah *in-line* nilai q adalah nilai dari gaya *drag* yang terjadi. Sedangkan untuk arah *cross-flow* nilai q merupakan nilai dari berat terendam pipa.

2.2.6.3 Critical Buckling Load

Menurut Bai dan Bai (2014), *critical buckling load* dipengaruhi oleh beberapa parameter diantaranya adalah kekakuan pipa, pengaruh kontak dengan tanah, berat terendam pipa. Persamaan menentukan *critical buckling load* sesuai dengan DNV-RP-F-105 (2006) adalah sebagai berikut:

$$P_{cr} = (1 + CSF) C_2 \pi^2 EI_{steel} / L_{eff}^2 \quad (2.82)$$

P_{cr}	: critical buckling load (N)
C_2	: boundary condition coefficient
E	: Young's modulus untuk steel (Pa)
I_{steel}	: momen inersia dari steel (m ⁴)
L_{eff}	: panjang <i>free span</i> efektif (m)

2.2.6.4 Effective Axial Force

Choi (2000) meneliti efek dari gaya aksial pada *freespan* pipa bawah laut. Dari hasil penelitiannya menunjukkan bahwa gaya aksial memiliki pengaruh yang signifikan pada frekuensi natural pipa. Gaya aksial sangat penting untuk menentukan panjang *freespan* yang diizinkan pada pipa bawah laut. Intensitas ini sangat krusial atau dominan dalam formasi tanah pada *seabed* karena kenaikan frekuensi natural pipa (Bakhtiary, 2007).

$$S_{eff} = H_{eff} - (1 - 2\nu)P_i \frac{\pi}{4}(D_i)^2 - \alpha_e \Delta T E A_s \quad (2.83)$$

S_{eff}	: effective axial force (N)
H_{eff}	: effective lay tension (N)
ν	: poisson's ratio dari steel
P_i	: perbedaan tekanan internal (Pa)
D_i	: diameter dalam pipa (m)
α_e	: koefisien ekspansi suhu (°C)
ΔT	: perbedaan temperatur (°C)
E	: Young's modulus untuk steel (Pa)
A_s	: cross section area pada steel pipa (m ²)

2.2.7 Interaksi Pipa dengan Tanah

2.2.7.1 Soil Damping

Soil damping (ζ_{soil}) dapat dilihat pada Tabel 2.6 atau Tabel 2.7 di bawah ini sesuai dengan jenis tanah yang berada di lokasi pipa dan juga rasio antara panjang *freespan* (L) dan diameter pipa (D_o).

Tabel 2.6 *Modal soil damping ratio* untuk pasir
(Sumber: DNV-RP-F-105, 2006)

<i>Sand type</i>	<i>Horizontal (in-line) direction L/D</i>			<i>Vertical (cross-flow) direction L/D</i>		
	<i>< 40</i>	<i>100</i>	<i>> 160</i>	<i>< 40</i>	<i>100</i>	<i>> 160</i>
Loose	3.0	2.0	1.0	2.0	1.4	0.8
Medium	1.5	1.5	1.5	1.2	1.0	0.8
Dense	1.5	1.5	1.5	1.2	1.0	0.8

Tabel 2.7 *Modal soil damping ratio* untuk clay
(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

<i>Clay type</i>	<i>Horizontal (in-line) direction L/D</i>			<i>Vertical (cross-flow) direction L/D</i>		
	<i>< 40</i>	<i>100</i>	<i>> 160</i>	<i>< 40</i>	<i>100</i>	<i>> 160</i>
Very soft - Soft	4.0	2.0	1.0	3.0	2.0	1.0
Firm – Stiff	2.0	1.4	0.8	1.2	1.0	0.8
Very stiff - Hard	1.4	1.0	0.6	0.7	0.6	0.5

DNV-RP-F105 (2006), juga menyebutkan bahwa untuk tujuan *screening*, *soil damping* (ζ_{soil}) dapat diasumsikan bernilai 0.01.

2.2.7.2 *Soil Stiffness dan Poisson's Ratio*

Soil stiffness merupakan parameter yang perlu didapatkan nilainya. *Soil stiffness* memiliki beberapa nilai tergantung pada kondisi yang diperhitungkan seperti statis, dinamis, vertikal, atau horizontal. Persamaannya sebagai berikut:

- K_v (*Dynamic Soil Stiffness Vertikal*)

$$K_v = \frac{c_v}{1-v_{soil}} \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D_t} \quad (2.84)$$

- K_L (*Dynamic Soil Stiffness Lateral*)

$$K_L = C_L (1 + v_{soil}) \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D_t} \quad (2.85)$$

K_v : kekakuan tanah dinamis vertikal (kN/m²)

K_L : kekakuan tanah dinamis lateral (kN/m²)

- C_v : koefisien untuk kekakuan tanah vertikal ($\text{kN/m}^{5/2}$)
- C_L : koefisien untuk kekakuan tanah lateral ($\text{kN/m}^{5/2}$)
- ν_{soil} : *poisson's ratio* dari tanah
- D_t : diameter luar total pipa (m)
- ρ_s/ρ : rasio massa spesifik antara massa pipa (tidak termasuk massa tambah) dan *buoyancy*

$$\frac{\rho_s}{\rho} = \frac{W_{sub} + F_b}{F_b} \quad (2.86)$$

W_{sub} : berat terendam pipa (N/m)

F_b : *buoyancy* pipa (N/m)

Untuk mendapatkan koefisien kekakuan tanah dinamis atau statis, vertikal atau lateral dapat menggunakan tabel berikut sesuai dengan jenis tanah yang ada:

Tabel 2.8 Faktor kekakuan dinamis dan statis untuk pasir
(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

<i>Sand type</i>	C_V ($\text{kN/m}^{5/2}$)	C_L ($\text{kN/m}^{5/2}$)	$K_{V,S}$ (kN/m/m)
Loose	10500	9000	250
Medium	14500	12500	530
Dense	21000	18000	1350

Tabel 2.9 Faktor kekakuan dinamis dan statis untuk *clay*
(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

<i>Clay type</i>	C_V ($\text{kN/m}^{5/2}$)	C_L ($\text{kN/m}^{5/2}$)	$K_{V,S}$ (kN/m/m)
Very soft	600	500	50-100
Soft	1400	1200	160-260
Firm	3000	2600	500-800
Stiff	4500	3900	1000-1600
Very stiff	11000	9500	2000-3000
Hard	12000	10500	2600-4200

$K_{v,s}$: kekakuan tanah statis vertikal (kN/m^2)

Poisson's ratio (ν) merupakan salah satu parameter khusus untuk tanah. Untuk menentukan nilainya dapat dilihat pada Tabel 2.10 atau Tabel 2.11 di bawah ini sesuai dengan jenis tanah pada lokasi pipa.

Tabel 2.10 Parameter geoteknik untuk tanah pasir
(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

<i>Soil type</i>	φ_s	γ_{soil}' [kN/m ³]	ν	e_s
Loose	28 – 30°	8.5 – 11.0	0.35	0.7 – 0.9
Medium	30 – 36°	9.0 – 12.5	0.35	0.5 – 0.8
Dense	36 – 41°	10.0 – 13.5	0.35	0.4 – 0.6

Tabel 2.11 Parameter geoteknik untuk tanah *clay*
(Sumber: DNV-RP-F105, 2006)

<i>Soil type</i>	s_u [kN/m ²]	γ_{soil}' [kN/m ³]	ν	e_s
Very soft	< 12.5	4 – 7	0.45	1.0 – 3.0
Soft	12.5 – 25	5 – 8	0.45	0.8 – 2.5
Firm	25 – 50	6 – 11	0.45	0.5 – 2.0
Stiff	50 – 100	7 – 12	0.45	0.4 – 1.7
Very stiff	100 – 200	10 – 13	0.45	0.3 – 0.9
Hard	> 200	10 – 13	0.45	0.3 – 0.9

φ : sudut dari gesekan (°)

s_u : *undrained shear strength, cohesive soils* (kN/m²)

γ_{soil} : berat unit tanah (kN/m³)

e_s : *void ratio*

2.2.8 Bending Moment

2.2.8.1 Bending Moment Total

Dalam Bai dan Bai (2014), *local buckling* dapat terjadi pada pipa yang terkena kombinasi beberapa beban diantaranya tekanan, gaya longitudinal, dan *bending*. Mode kegagalan mungkin menghasilkan tekuk pada sisi tekan pipa. Cek *local buckling* dapat dipisahkan menjadi dua yaitu untuk kondisi *load control* (*bending moment*) dan kondisi *displacement control* (*strain level*). Untuk kondisi *free span* dapat menggunakan kondisi *load control* sesuai yang dituliskan pada DNV RP F105 (2006), sehingga perhitungan untuk *bending moment* sangat perlu

untuk dilakukan. Berdasarkan DNV OS-F101 (2013), persamaan untuk menghitung *bending moment* pada *free span pipeline* adalah seperti berikut:

$$M_{Sd} = M_F \gamma_F \gamma_C + M_E \gamma_E + M_I \gamma_F \gamma_C + M_F \gamma_A \gamma_C \quad (2.87)$$

M_{Sd} : *bending moment* total (Nm)

M_F : momen karena beban fungsional (Nm)

M_E : momen karena *environmental load* (Nm)

M_I : momen karena *interference load* (Nm)

γ_F : faktor pembebanan untuk beban fungsional

γ_C : faktor pengaruh kondisi beban

γ_E : faktor pembebanan untuk *environmental load*

γ_A : faktor pembebanan untuk *accidental load*

Untuk mendapatkan faktor pembebanan tersebut dapat digunakan faktor pembebanan sesuai dalam DNV-OS-F101 (2013) pada **Tabel 2.** sebagai berikut:

Tabel 2.12 Faktor pembebanan untuk kombinasi beban
(Sumber: DNV-OS-F101, 2013)

Limit State / Load combination	Load effect combination		Functional loads ¹⁾	Environmental load	Interference loads	Accidental loads
			γ_F	γ_E	γ_F	γ_A
ULS	a	System check ²⁾	1.2	0.7		
	b	Local check	1.1	1.3	1.1	
FLS	c		1.0	1.0	1.0	
ALS	d		1.0	1.0	1.0	1.0
1) If the functional load effect reduces the combined load effects, γ_F shall be taken as 1/1.1.						
2) This load effect factor combination shall only be checked when system effects are present, i.e. when the major part of the pipeline is exposed to the same functional load. This will typically only apply to pipeline installation.						

Dalam Tabel 2. di atas dapat dilihat bahwa untuk pengecekan ULS terdapat dua *load effect combination* dengan fungsi masing – masing. DNV OS-F101 (2013), menyebutkan bahwa untuk *system check* digunakan untuk menganalisis beberapa kasus seperti *pressure containment*, *collaps*, dan *installation*. Sedangkan untuk *local check* digunakan pada analisis *local buckling*. Sedangkan untuk mendapatkan γ_C dapat digunakan Tabel 2.13 berikut:

Tabel 2.13 Faktor kondisi beban
(Sumber: DNV-OS-F101, 2013)

<i>Condition</i>	γ_c
Pipeline resting on uneven seabed	1.07
Reeling on and J-tube pull-in	0.82
System pressure test	0.93
Otherwise	1.00

Dari Tabel 2.13 di atas terdapat nilai γ_c untuk beberapa kondisi. Untuk kondisi *freespan* digunakan nilai 1,07 sesuai dengan kegunaannya.

Pada pembebanan *freespan* umumnya hanya diperhitungkan dua faktor pembebanan, sehingga persamaan di atas (2.87) dapat diganti dengan Pers. (2.88) di bawah ini:

$$M_{sd} = M_F \gamma_F \gamma_c + M_E \gamma_E \quad (2.88)$$

1. *Bending moment* akibat beban fungsional

Perhitungan dilakukan menggunakan teori mekanika teknik seperti yang dijelaskan pada Bai dan Bai (2014), untuk mendapatkan *bending moment* akibat beban fungsional ini dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

a. *Pinned-pinned boundary condition*

$$M_{max} = \frac{qL^2}{8} \quad (2.89)$$

b. *Fixed-fixed boundary condition*

$$M_{max} = \frac{qL^2}{12} \quad (2.90)$$

c. *Fixed-pinned boundary condition*

$$M_{max} = \frac{qL^2}{10} \quad (2.91)$$

M_{max} : *bending moment* maksimal (Nm)

q : beban defleksi yang diterima (N/m)

L : panjang *free span* aktual (m)

Beban (q) yang digunakan untuk mendapatkan momen fungsional adalah beban fungsional pipa itu sendiri yaitu berupa berat terendam pipa (W_{sub}). Sehingga persamaan di atas dapat diganti seperti berikut (*pinned-pinned boundary condition*):

$$M_F = \frac{W_{sub} L^2}{8} \quad (2.92)$$

2. Bending moment akibat beban lingkungan

Untuk kondisi *free span*, momen karena pengaruh beban lingkungan menghasilkan dua arah sesuai dengan arah pembebanan yang ditinjau yaitu untuk kondisi *in-line* (horizontal) dan *cross-flow* (vertikal). Perbedaan keduanya terdapat pada *environmental stress* yang disubstitusikan ke dalam persamaan. Persamaan untuk mendapatkan *bending moment* karena pengaruh beban lingkungan dapat dilihat pada Pers. (2.93) berikut:

$$M_E = \sigma_E \frac{2I_{steel}}{D_0 - t_{nom}} \quad (2.93)$$

M_E : tegangan karena pengaruh beban lingkungan (Pa)

D_0 : diameter luar *steel* pipa (m)

I_{steel} : momen inersia *steel* pipa (m⁴)

t_{nom} : tebal dinding pipa(m)

3. Bending moment kombinasi

Bending moment di atas menghasilkan nilai dengan kombinasi arah *moment* yang berbeda yaitu horizontal ($M_{E(IL)}$) dan vertikal ($M_{E(CF)}$ dan M_F), sehingga perlu untuk mendapatkan resultan *bending moment*nya.

$$M_{Sd} = \sqrt{(M_F \gamma_F \gamma_C)^2 + (M_{E(CF)} \gamma_E)^2 + (M_{E(IL)} \gamma_E)^2} \quad (2.94)$$

2.2.8.2 Maximum Environmental Stress

Untuk mendapatkan *maximum environmental stress* dapat digunakan persamaan berikut untuk arah *in-line* dan *cross-flow*:

$$\text{In-Line} \quad \sigma_E = \frac{1}{2} \max \left\{ S_{IL}; 0,4 S_{CF} \frac{A_{IL}}{A_{CF}} \right\} + \sigma_{FM} \quad (2.95)$$

$$\text{Cross-Flow} \quad \sigma_E = \frac{1}{2} S_{CF} \quad (2.96)$$

σ_E : *environmental stress* (Pa)

S_{IL} : *stress range (in-line)* (Pa)

S_{CF} : *stress range (cross-flow)* (Pa)

A_{IL} : *in-line unit amplitude stress* (Pa)

A_{CF} : *cross-flow unit amplitude stress* (Pa)
 σ_{FM} : *environmental stress due to direct wave loading* (Pa)

$$\sigma_{FM} = \frac{M_W D_0 - t_2}{2I_{steel}} \quad (2.97)$$

M_W : momen karena gaya *drag* aliran air (Nm)

$$M_W = C_5 \left(\frac{F_D L_{eff}}{1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}}} \right) \quad (2.98)$$

F_D : gaya *drag* aliran air (N)
 L_{eff} : panjang *free span* efektif (m)
 S_{eff} : *effective axial force* (N)
 P_{cr} : *critical buckling load* (N)

2.2.9 Analisis Ultimate Limit State (ULS)

Menurut Bai dan Bai (2014), salah satu *limit state* yang perlu untuk dilakukan pengecekan adalah ULS yaitu batasan yang berkaitan dengan pengaruh beban tunggal atau situasi *overload*. *Ultimate Limit State* (ULS) menunjukkan kapasitas maksimum untuk menerima beban yang berasal dari gaya internal maupun eksternal yang mengenai struktur pipa. Pengecekan yang dilakukan pada umumnya terdiri dari dua hal yaitu pengecekan terhadap tegangan-tegangan yang terjadi pada pipa dan *buckling*. Berdasarkan DNV RP-F105 (2006), ada beberapa tipe efek beban yang harus diperhatikan untuk cek ULS:

- Arah Vertikal
 - Bending statis (*self-weight*, profil dasar laut dan lain – lain)
 - *Cross-flow* VIV
 - Pengaruh pukot
- Arah Horizontal
 - Efek dari kombinasi beban berupa gaya *drag* dan gaya inersia yang secara langsung mengenai pipa
 - *In-line* VIV
 - Pengaruh pukot

2.2.9.1 Buckling pada Pipeline

2.2.9.1.1 Kriteria Local Buckling

Ketika pipa terkena momen lentur (*bending moment*), tegangan longitudinal menghasilkan komponen gaya melintang selama terjadi kelengkungan pipa. Sebagai pipa melengkung, komponen dari tegangan *bending* longitudinal berpengaruh pada penampang pipa (*cross section area*). Hal ini akan mengakibatkan terjadinya momen melintang, ovalisasi, sampai terjadi keruntuhan (*collaps*). Sebuah pipa yang mengalami *bending* akan *collaps* ketika penampang menyilang (*cross section area*) kehilangan kekakuan karena perubahan bentuk secara mekanik atau disebut *local buckling*. Titik tersebut merupakan titik lemah dari suatu pipa yang berpotensi terjadi ovalisasi yang nantinya dapat mengakibatkan kegagalan *local buckling* (Chakrabarti, 2005).

Pipa yang mengalami *bending* dapat terjadi kegagalan karena pengaruh *local buckling*, *collapse*, atau kepecahan. Namun, *local buckling* atau batas *collapse* sangat berperan dalam penentuan desain. *Local buckling* terjadi pada pipa yang mengalami tekanan kombinasi, gaya longitudinal, dan *bending*. Mode kegagalan memungkinkan terjadi kelenturan pada penampang pipa yang selanjutnya terjadi *buckling*. Pengecekan *local buckling* dapat dilakukan pada *pipeline* kondisi *load control* (*bending moment*) dan *displacement control* (*strain level*) (Bai dan Bai, 2014).

Pengecekan *local buckling* pada *pipeline free span* sesuai yang terdapat dalam DNV RP-F105 (2006), yaitu menggunakan kombinasi beban dan kondisi *load controlled* pada kriteria yang terdapat dalam DNV OS-F101 (2013). Menurut Dong dkk (2015) kriteria kegagalan *local buckling* pada *pipeline* karena kombinasi beban dari *external pressure*, *internal pressure*, *bending moment*, dan *effective axial force* sesuai dengan yang ditunjukkan pada DNV OS-F101 (2013) yaitu:

untuk $15 \leq \frac{D_0}{t_2} \leq 45; P_i > P_e$

$$\left\{ \gamma_m \gamma_{SC} \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \gamma_{SC} S_{Sd}(P_i)}{\alpha_c S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \frac{P_i - P_e}{\alpha_c P_b(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (2.99)$$

atau,

untuk $15 \leq \frac{D_0}{t_2} \leq 45; P_i < P_e$

$$\left\{ \gamma_m \gamma_{SC} \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \gamma_{SC} S_{Sd}}{\alpha_c S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \gamma_{SC} \frac{P_e - P_{min}}{P_c(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (2.100)$$

γ_m : faktor tahanan material
 γ_{SC} : faktor keamanan *resistance*
 M_{Sd} : *bending moment* (Nm)
 S_{Sd} : desain *effective axial force* (N)

$$S_{Sd} = S_{eff} \gamma_F \gamma_C \quad (2.101)$$

M_p : *denote plastic moment capacities* (Nm)

$$M_p(t_2) = f_y (D_0 - t_2)^2 t_2 \quad (2.102)$$

S_p : *denote plastic axial force capacities* (N)

$$S_p(t_2) = f_y \pi (D_0 - t_2) t_2 \quad (2.103)$$

f_y : karakteristik kekuatan material (Pa) Bagian (2.2.9.1.1.1)

t_2 : tebal dinding pipa (m)

α_c : parameter aliran tegangan

$$\alpha_c = (1 - \beta) + \beta \frac{f_u}{f_y} \quad (2.104)$$

α_p : faktor tekanan untuk beban kombinasi

$$\alpha_p = \begin{cases} 1 - \beta & \text{untuk } \frac{P_i - P_e}{P_b} < \frac{2}{3} \\ 1 - 3\beta \left(1 - \frac{P_i - P_e}{P_b} \right) & \text{untuk } \frac{P_i - P_e}{P_b} \geq \frac{2}{3} \end{cases} \quad (2.105)$$

β : faktor untuk kriteria kombinasi beban

$$\beta = \frac{60 - \frac{D_0}{t_2}}{90} \quad (2.106)$$

P_i : tekanan internal (Pa)

P_e : tekanan eksternal (Pa)

P_{min} : tekanan internal minimum (Pa)

P_b : *pressure containment resistance* atau tekanan *bursting* (Pa)

$$P_b(t_2) = \frac{2t_2}{D_0 - t_2} f_{cb} \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (2.107)$$

f_{cb} merupakan nilai paling kecil yang diambil dari f_y dan $\frac{f_u}{1.15}$

$$f_{cb} = \min \left[f_y; \frac{f_u}{1.15} \right] \quad (2.108)$$

P_c : tekanan karakteristik *collaps* (Pa)

D_0 : diameter luar pipa (m)

Faktor tahanan material (γ_m) dapat menggunakan Tabel 2.14 berikut, sesuai yang ada dalam DNV-OS-F101 (2013):

Tabel 2.14 Faktor tahanan material
(Sumber: DNV-OS-F101, 2013)

<i>Limit state category¹⁾</i>	<i>SLS/ULS/ALS</i>	<i>FLS</i>
γ_m	1.15	1.00
1) The limit states (SLS, ULS, ALS and FLS) are defined in D.		

Sedangkan untuk faktor keamanan sesuai kelas, dapat menggunakan Tabel 2.15 seperti yang tersedia dalam DNV-OS-F101 (2013) berikut:

Tabel 2.15 Faktor keamanan *resistance*
(Sumber: DNV-OS-F101, 2013)

<i>Safety class</i>	γ_{sc}		
	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>
Pressure containment ¹⁾	1.046 ^{2),3)}	1.138	1.308 ⁴⁾
Other	1.04	1.14	1.26
1) The number of significant digits is given in order to comply with the ISO usage factors. 2) Safety class low will be governed by the system pressure test which is required to be 3% above the incidental pressure. Hence, for operation in safety class low, the resistance factor will effectively be minimum 3% higher. 3) For system pressure test, α_U shall be equal to 1.00, which gives an allowable hoop stress of 96% of SMYS both for materials fulfilling supplementary requirement U and those not. 4) For parts of pipelines in location class 1, resistance safety class medium may be applied (1.138).			

2.2.9.1.1.1. Karakteristik Kekuatan Material

Karakteristik kekuatan material dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$f_y = (SMYS - f_{y,temp}) \alpha_U \quad (2.109)$$

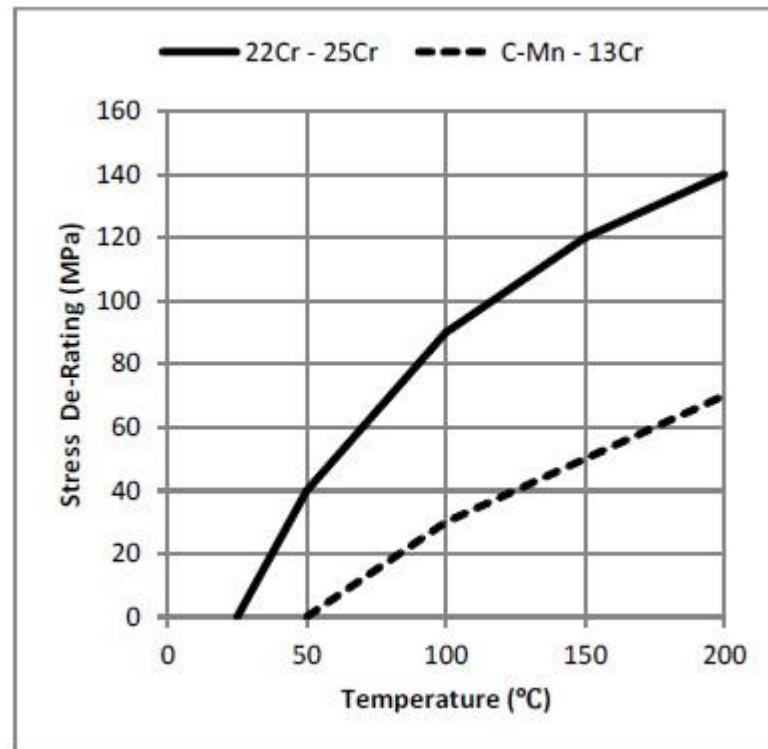
$$f_u = (SMYS - f_{u,temp}) \alpha_U \quad (2.110)$$

$f_{y,temp}$: nilai *de-rating* pengaruh temperatur dari *yield stress* (Pa)

$f_{u,temp}$: nilai *de-rating* pengaruh temperatur dari *tensile strength* (Pa)

α_U : faktor kekuatan material

Jika tidak ada data mengenai nilai *de-rating* untuk *yield stress* ($f_{y,temp}$), dapat digunakan grafik di bawah ini sesuai yang disarankan oleh DNV-OS-F101 (2013).



Gambar 2.9 Grafik nilai *de-rating* untuk *yield stress*

(Sumber: DNV OS-F101, 2013)

Dari grafik di atas, nilai *de-rating yield stress* yang didapatkan tergantung pada suhu dan jenis material yang digunakan untuk pembuatan pipa.

Nilai *de-rating* untuk *tensile strength* atau *ultimate stress* ($f_{u,temp}$), sesuai dengan apa yang terdapat dalam DNV OS-F101 (2013) bahwa jika tidak ada informasi data yang jelas mengenai hal ini, nilainya dapat disamakan dengan nilai *de-rating* untuk *yield stress*. Faktor kekuatan material didapat menggunakan Tabel 2.16 berikut:

Tabel 2.16 Faktor kekuatan material
(Sumber: DNV OS-F101, 2013)

<i>Factor</i>	<i>Normally</i>	<i>Supplementary requirement U</i>
α_U	0.96	1.00

2.2.9.1.2 Tegangan *Buckling* Kritis

Selain menggunakan persamaan ULS *check* atau menggunakan nilai *bending moment* kritis, salah satu kriteria *local buckling* lainnya adalah mendapatkan tegangan kombinasi atau *von-mises* yang dihasilkan dari kondisi *free span pipeline* kemudian dibandingkan dengan nilai tegangan *buckling*. *Local buckling* dapat terjadi jika nilai tegangan *von-mises* lebih besar dari nilai tegangan *buckling* kritis. Nilai tegangan *buckling* kritis didapat menggunakan persamaan berikut (Bai, 2003):

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{steel}}{A_s L^2} \quad (2.111)$$

σ_{cr} : tegangan kritis *buckling* (Pa)

E : *modulus Young steel* (Pa)

I_{steel} : momen inersia *steel* (m⁴)

A_s : area dari *steel* pipa (m²)

L : panjang *free span* aktual (m)

2.2.9.2 Tegangan *Von-Mises*

Kombinasi dari beberapa beban akan dapat menghasilkan tegangan *von-mises*. Tegangan *von-mises* juga disebut tegangan *equivalent* dan persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut (Bai dan Bai, 2014):

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - \sigma_h \cdot \sigma_L + 3 \cdot \tau_x^2} \quad (2.112)$$

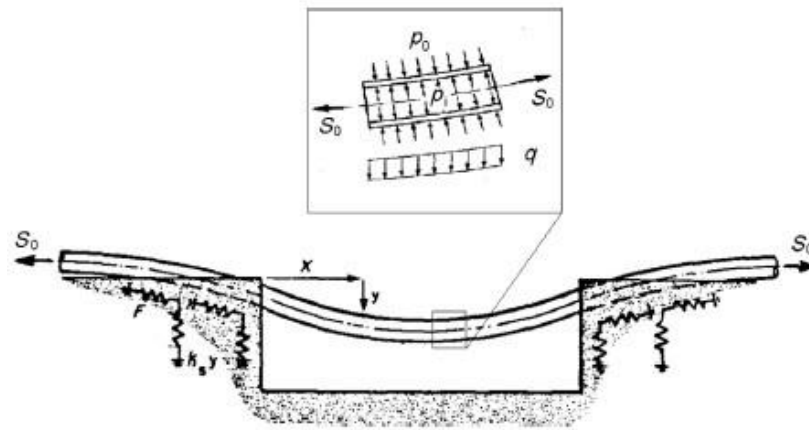
σ_E : tegangan *equivalent* (Pa)

σ_h : tegangan *hoop* (Pa)

σ_L : tegangan longitudinal (Pa)

τ_x : tegangan *tangential shear* (Pa)

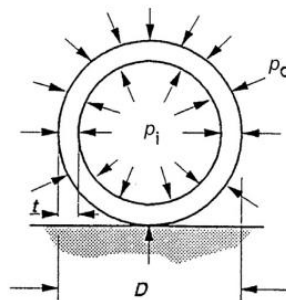
Dalam Bai dan Bai (2014) disebutkan bahwa untuk tegangan *tangential shear* (τ_x) pada kondisi *pipeline span* nilainya adalah nol atau diabaikan.



Gambar 2.10 Ilustrasi kombinasi beban pada *freespan* pipa bawah laut
(Sumber: Bai dan Bai, 2014)

2.2.9.2.1 Tegangan *Hoop*

Hoop stress atau yang biasa dikenal dengan tegangan tangensial ini merupakan tegangan yang diakibatkan adanya tekanan fluida yang diberikan pada suatu silinder sehingga muncul reaksi dari material penyusun silinder pipa. Tekanan fluida yang dimaksud adalah tekanan yang diberikan dari dalam pipa yaitu tekanan fluida yang mengalir dalam pipa maupun dari luar pipa yang disebabkan oleh tekanan hidrostatik.



Gambar 2.11 Ilustrasi *hoop stress* pada pipa
(Sumber: Bai dan Bai, 2014)

Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai tegangan *hoop*:

$$\sigma_h = (P_i - P_e) \frac{D_0 - t_2}{2t_2} \quad (2.113)$$

- P_i : tekanan internal (Pa)
- P_e : tekanan eksternal (Pa)
- D_0 : diameter luar nominal pipa (m)
- t_2 : tebal dinding pipa (m)

2.2.9.2.2 Tegangan *Longitudinal*

Longitudinal stress merupakan kombinasi dari *bending stress*, *thermal stress*, *end cap effect stress*, dan *poisson stress*. Tegangan ini merupakan tegangan aksial yang bekerja pada penampang pipa. Persamaan *longitudinal stress* (σ_L) adalah sebagai berikut :

$$\sigma_L = \sigma_T + \sigma_p \pm \sigma_b \quad (2.114)$$

σ_T : tegangan *thermal* (Pa)

$$\sigma_T = -E\alpha_e\Delta T \quad (2.115)$$

E : modulus Young dari *steel* (Pa)

α_e : koefisien *temperature expansion* ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT : perbedaan temperatur dengan saat *lay* ($^{\circ}\text{C}$)

σ_p : *Poisson stress* (Pa)

$$\sigma_p = v\sigma_h \quad (2.116)$$

v : *poisson's ratio steel*

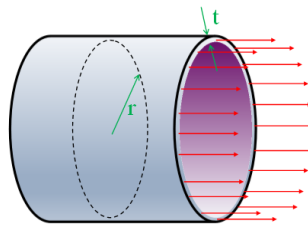
σ_b : tegangan *bending* (Pa)

$$\sigma_b = \frac{M_{sd}D_0}{2I_{steel}} \quad (2.117)$$

M_{sd} : *bending moment* (Nm)

D_0 : diameter luar pipa (m)

I_{steel} : momen inersia baja pipa (m^4)



Gambar 2.12 Ilustrasi tegangan longitudinal
(Sumber: www.datagenetics.com)

2.2.10 Mitigasi Pipa Bawah Laut yang Mengalami *Freespan*

Bai dan Bai (2014), Jika *span pipeline* sudah dalam kondisi kritis dengan pengaruh VIV, *span* harus dilakukan evaluasi atau koreksi dengan *rock dumping* di bawah *pipeline* untuk memperpendek panjang *freespan* dan meningkatkan frekuensi natural pipa pada kondisi *freespan*. Koreksi *free span* berikut dapat digunakan untuk memperbaiki panjang *freespan* yang melebihi *freespan* yang diizinkan:

- *Mattras* dan *bags*
- *Trenching*
- *Rock dumping*
- *Mechanical support*

Koreksi tersebut dapat digunakan untuk melakukan evaluasi panjang *freespan*. Evaluasi *freespan* dengan mengurangi panjang *freespan* yang terjadi, *freespan* dilakukan koreksi jika panjangnya sudah mendekati panjang maksimal *freespan* yang diizinkan yang diperoleh dalam beberapa tahapan analisis *freespan*.

2.2.11 Metode Elemen Hingga

2.2.11.1 Dasar Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga (*Finite Element Method*) atau sering disebut dengan FEM adalah konsep penyelesaian suatu permasalahan struktur dengan cara membagi obyek analisis menjadi bagian – bagian kecil yang terhingga. Bagian – bagian kecil ini kemudian dianalisis dan hasilnya digabungkan kembali untuk mendapatkan penyelesaian keseluruhan struktur.

Membagi bagian analisis menjadi bagian – bagian kecil disebut diskritisasi. Bagian – bagian kecil ini disebut elemen yang terdiri dari titik – titik sudut (*nodal* atau *node*) dan daerah elemen yang terbentuk dari titik – titik tersebut. Membagi sebuah obyek menjadi bagian – bagian kecil secara fisika sebenarnya menuntun kita kepada pembuatan persamaan diferensial. Secara lebih matematis, FEM didefinisikan sebagai teknik numerik untuk menyelesaikan permasalahan struktur yang dinyatakan dalam persamaan diferensial. Konsep dasar Metode Elemen Hingga adalah sebagai berikut:

1. Menjadikan elemen-elemen diskrit untuk memperoleh simpangan – simpangan dan gaya – gaya anggota dari suatu struktur.
2. Menggunakan elemen – elemen kontinum untuk memperoleh solusi pendekatan terhadap permasalahan perpindahan panas, mekanika fluida dan mekanika solid.

2.2.11.2 Metode Elemen Hingga pada ANSYS

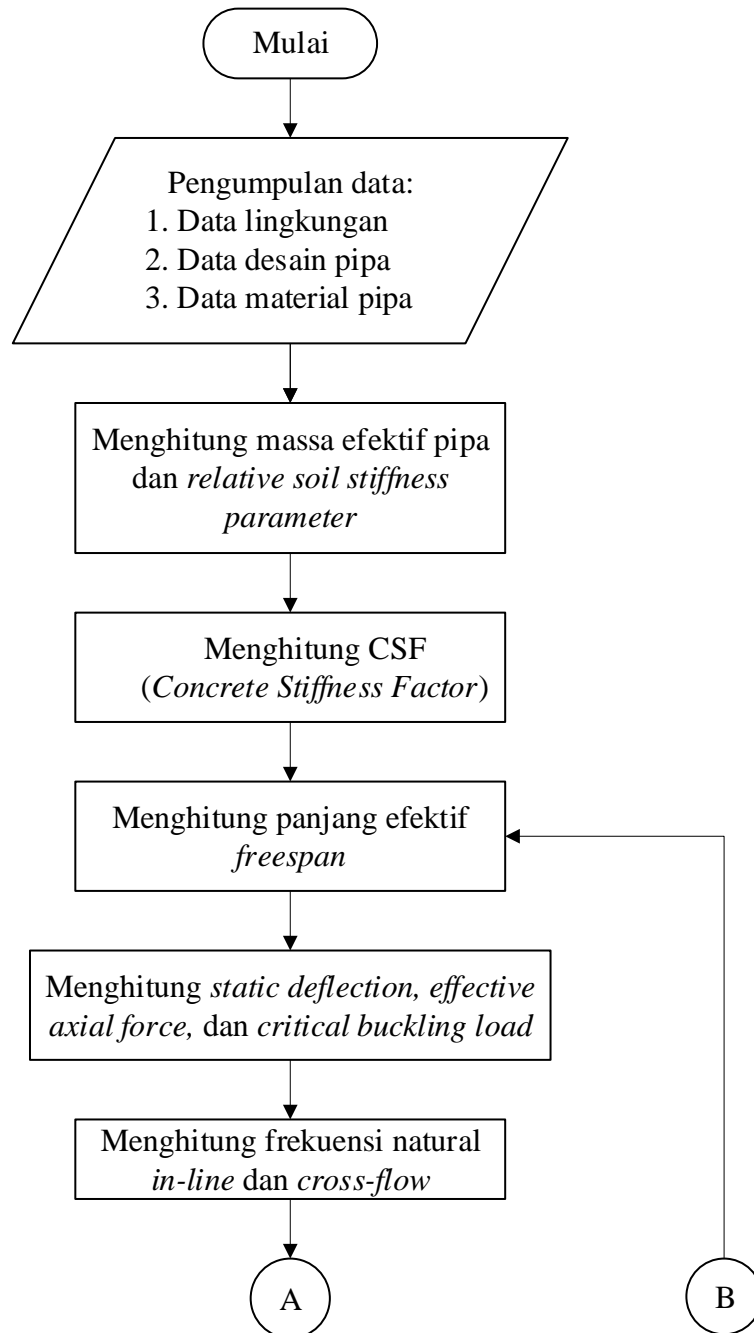
ANSYS adalah program paket yang dapat memodelkan elemen hingga untuk menyelesaikan masalah yang berhubungan dengan mekanika, termasuk di dalamnya masalah statik, dinamik, analisis struktural (linier maupun nonlinier), masalah perpindahan panas, masalah fluida dan juga masalah yang berhubungan dengan akustik dan elektromagnetik. *Software* ini menjadikan bentuk fisik model struktur sebagai suatu sistem linier yang berkesinambungan dengan cara membagi bentuk fisik tersebut menjadi kelompok elemen – elemen yang lebih kecil (*meshing*). Elemen-elemen ini dihubungkan dengan simpul – simpul (*nodes*) sehingga menjadi satu sistem yang kontinu.

BAB III

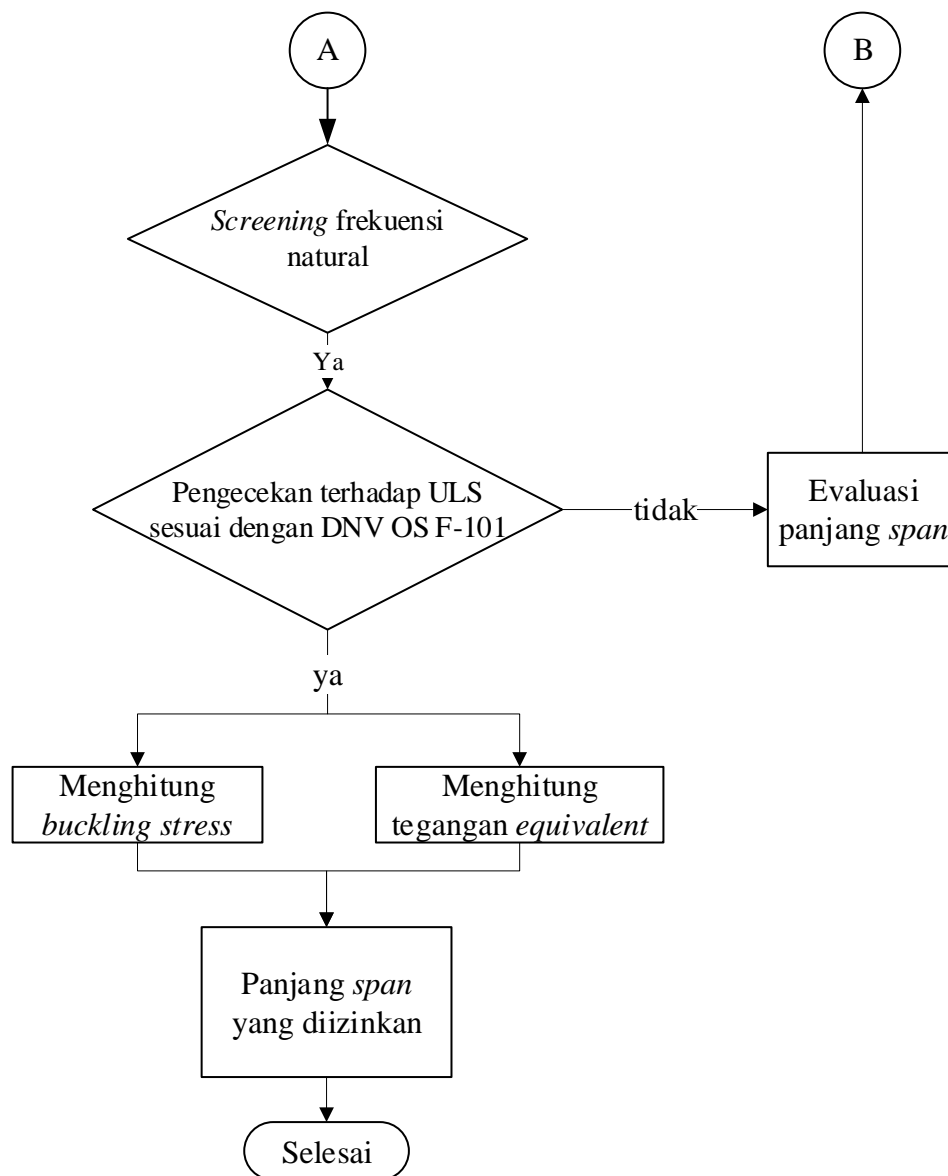
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Metode penelitian dari pengerjaan tugas akhir ini disajikan dalam diagram alir dibawah ini:



Gambar 3.1 Diagram alir pengerjaan tugas akhir



3.1. Diagram alir pengerjaan tugas akhir (Lanjutan)

3.2 Penjelasan Diagram Alir

Berdasarkan diagram alir di atas, berikut adalah penjelasan langkah – langkah dalam pengerjaan tugas akhir ini:

1. Studi Literatur

Tahap awal pengerjaan tugas akhir ini adalah mengumpulkan semua materi yang berasal dari jurnal, buku, laporan tugas akhir, serta *code* atau standar yang akan digunakan sebagai bahan untuk studi.

2. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah data desain pipa data lingkungan dan data material pipa.

3. Perhitungan Panjang Efektif *Freespan*

Perhitungan panjang efektif pada *freespan* ini berdasarkan DNV RP F-105: *Free Spanning Pipelines* 2006. Perhitungan panjang efektif *span* memerlukan *relative soil stiffness parameter* sebagai pertimbangan untuk memilih persamaan dan CSF (*Concrete Stiffness Factor*) untuk mengetahui pengaruh *concrete coating* pada pipa bawah laut.

4. *Screening* Frekuensi Natural

Setelah dilakukan perhitungan panjang efektif *span*, langkah selanjutnya adalah melakukan *screening* pada *span* tersebut. *Span* pada pipa yang memenuhi kriteria dapat dianalisis untuk kondisi ULS, sedangkan *span* pipa yang tidak memenuhi *screening* harus dianalisa terlebih dahulu untuk ketahanannya terhadap beban siklik. Tetapi pada tugas akhir ini tidak dilakukan analisis kelelahan. *Screening* ini dilakukan dengan cek frekuensi natural pipa kondisi *in-line* dan *cross-flow* yang dibandingkan dengan frekuensi natural lingkungan sesuai dengan *codes* DNV RP F-105: *Free Spanning Pipelines* (2006). Ada beberapa parameter yang harus diketahui untuk menghitung periode natural kondisi *in-line* dan *cross-flow* yaitu *static deflection*, *effective axial force* dan *critical buckling load*.

5. Pengecekan terhadap ULS

Pengecekan terhadap ULS dilakukan dengan acuan dari *codes* DNV OS F101: *Submarine Pipeline System* 2013. Parameter yang harus diketahui terlebih dahulu adalah *denote plastic capacities* yang harus diketahui terlebih dahulu kekuatan material dari pipa yang dihitung, *functional load* dan *environmental stress* kondisi *in-line* dan *cross-flow* untuk mengetahui bending momen akibat beban lingkungan, tegangan *equivalent* dan *buckling stress* sebagai nilai batas atau nilai kritis tegangan *equivalent*. Pengecekan terhadap ULS juga akan dilakukan dengan pemodelan menggunakan *software* yang bertujuan untuk memberikan validasi dan visualisasi tegangan ekuivalen dari hasil komputasi manual yang telah dilakukan. *Freespan* pipa

yang belum memenuhi kriteria ULS harus dilakukan evaluasi terhadap panjang *freespan*.

6. Menghitung *buckling stress*

Buckling stress merupakan batas dari tegangan ekuivalen. Nilai panjang *span* yang digunakan adalah panjang *span* maksimal yang diizinkan.

7. Menghitung Tegangan *Equivalent*

Nilai tegangan ekuivalen tidak boleh melebihi besarnya tegangan *buckling*. Tegangan ekuivalen dipengaruhi oleh tegangan *hoop*, tegangan *longitudinal* dan *tangential stress*. Sedangkan tegangan *longitudinal* besarnya dipengaruhi oleh tegangan *thermal*, *poisson stress* dan tegangan *bending*.

8. Panjang *Span* yang Diizinkan untuk ULS

Panjang *span* yang diizinkan setelah pengecekan terhadap ULS merupakan hasil akhir dari tugas akhir ini. Panjang *freespan* maksimal yang diizinkan adalah panjang terpendek dari beberapa hasil *screening* yang telah dilakukan.

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Tugas Akhir

Data yang digunakan untuk analisis pada tugas akhir ini adalah data pipa bawah laut milik PT. X yang beroperasi di Madura, Jawa Timur. Pipa bawah laut tersebut menyalurkan gas hasil pengeboran dari *wellhead platform* ke *Central Processing Platform* (CPP). Data yang diperlukan untuk analisis adalah data desain pipa, data lingkungan, data tanah dan data operasional pipa lainnya.

4.1.1 Data Desain Pipa Bawah Laut

a. Data Properti Pipa

Tabel 4. 1 Data properti pipa bawah laut
(Sumber: PT. X, 2017)

<i>Parameters</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>
<i>Pipe Material</i>	-	<i>Carbon Steel</i>
<i>Pipe Grade</i>	-	API 5L X52-PSL2
<i>Pipe Outside Diameter</i>	mm	219.1
<i>Wall Thickness</i>	mm	12.7
<i>Corrosion Allowance</i>	mm	3
<i>Pipe Joint Length</i>	m	12.1
<i>SMYS</i>	MPa	360
<i>SMTS</i>	MPa	460
<i>Steel Density</i>	kg/m ³	7850
<i>Young's Modulus</i>	MPa	207000
<i>Thermal Expansion Coefficient</i>	/°C	1.17E-05
<i>Heat Capacity</i>	J/kg°C	500
<i>Poisson's Ratio</i>	-	0.3
<i>Approximate Pipeline Length</i>	m	7083

b. Data Coating Pipa

Tabel 4. 2 Data coating pipa bawah laut
(Sumber: PT. X, 2017)

<i>Parameters</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>	
<i>Anti-Corrosion Coating</i>			
<i>Anti-Corrosion Coating Type</i>	-	AE	FBE
<i>Anti-Corrosion Coating Thickness</i>	mm	4	0.5
<i>Anti-Corrosion Coating Density</i>	kg/m ³	1300	1630
<i>Anti-Corrosion Coating Cut Back Length</i>	mm	200	200
<i>Concrete Weight Coating</i>			
<i>Concrete Weight Coating Thickness</i>	mm	25	
<i>Concrete Weight Coating Density</i>	kg/m ³	3044	
<i>Concrete Weight Coating Cut Back Length</i>	mm	300±10	
<i>Max. Water Absorption</i>	%	5	
<i>Field Joint Coating</i>			
<i>Field Joint Coating Type</i>	-	<i>Heat-Shrink Sleeve with HDPU Foam Infill</i>	
<i>Field Joint Coating Density</i>	kg/m ³	150	

c. Data Operasional

Tabel 4.3 Data operasional pipa bawah laut
(Sumber: PT. X, 2017)

<i>Parameters</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>
<i>Design Life</i>	years	20
<i>Design Pressure</i>	MPa	4.31
<i>Hydrotest Pressure</i>	MPa	6.03
<i>Design Teperature</i>	°C	75
<i>Max. Operating Temperature</i>	°C	65
<i>Max. Product Density</i>	kg/m ³	24.18
<i>Min. Product Density</i>	kg/m ³	19

d. Data Kedalaman Perairan

Tabel 4.4 Data kedalaman perairan
(Sumber: PT. X, 2017)

<i>Parameters</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>
<i>Water Depth at Platform Location</i>	m	56.693
<i>Water Depth Along Pipeline Route</i>	m	57.693

e. Data *Water Level*

Tabel 4.5 berikut merupakan data tambahan kedalaman perairan pada setiap kondisi pasang surut air laut.

Tabel 4.5 Data *water level*
(Sumber: PT. X, 2017)

<i>Parameters</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>	
		<i>1 year</i>	<i>100 year</i>
HAT	m	2.44	
MSL	s	1.1	
LAT	m	0	
<i>Storm Surge</i>	s	0.09	0.15

4.1.2 Data Lingkungan

a. Data Gelombang

Tabel 4.6 Data gelombang
(Sumber: PT. X, 2017)

<i>Parameters</i>	<i>Notasi</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>	
			<i>1 year</i>	<i>100 year</i>
<i>Max. Wave Height</i>	H_{\max}	m	5.18	9.14
<i>Max. Wave Period</i>	T_{\max}	s	7.2	10
<i>Significant Wave Height</i>	H_s	m	2.78	4.92
<i>Mean Period of Wave</i>	T_m	s	5.4	7.5
<i>Spectral Peak Period</i>	T_p	s	6.9	9.5

b. Data Arus

Data yang disajikan pada Tabel 4.7 dibawah ini mengasumsikan tinggi acuan kecepatan arus adalah 1meter diatas *seabed*.

Tabel 4.7 Data arus
(Sumber: PT. X, 2017)

<i>Parameters</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>			
<i>Current</i>					
<i>Current at Surface</i>	m/s	1 year	1.07	100 years	1.37
<i>Current at Mudline</i>	m/s	1 year	0.24	100 years	0.24
<i>Velocity</i>					
<i>Mean Current Velocity (installation & hydrotest)</i>	m/s	1.081			

Tabel 4.7 Data arus (lanjutan)

<i>Parameters</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>
<i>Velocity</i>		
<i>Mean Current Velocity (operation)</i>	m/s	1.384
<i>Significant Flow Velocity (installation & hydrotest)</i>	m/s	0.033
<i>Significant Flow Velocity (operation)</i>	m/s	0.224

4.1.3 Data Tanah

Tabel 4.8 Data tanah
(Sumber: PT. X, 2017)

<i>Soil Description</i>	<i>Undrained Shear Strength (kPa)</i>	<i>Soil Density (kN/m³)</i>	<i>Analysis Condition</i>	<i>Effective Axial Force (kN)</i>
<i>CLAY, very soft</i>	4	16.69	<i>Installation</i>	0
			<i>Hydrotest</i>	343.303
			<i>Operating 100% CA</i>	261.239

4.2 Perhitungan Umum Pipa Bawah Laut

Perhitungan umum pipa bawah laut merupakan perhitungan awal untuk melakukan berbagai analisis pada pipa bawah laut, seperti yang telah dijelaskan pada bab 2.

4.2.1 Properti Pipa

Tabel 4.10 dibawah ini merupakan parameter awal properti pipa yang berasal dari PT. X pada bagian 4.1 yang nantinya akan digunakan untuk menghitung perhitungan umum pipa.

Tabel 4.9 Parameter properti pipa

Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
Diameter luar pipa nominal	D ₀	0.2191		m
Tebal nominal dinding pipa	t _{nom}	0.0127		m
Tebal <i>corrosion allowance</i>	t _{corr}	0.0015		m
Tebal <i>coating</i> korosi	t _{cc}	AE	0.004	m
		FBE	0.0005	
Tebal <i>concrete coating</i>	t _{wc}	0.025		m
Tebal <i>marine growth</i>	t _{mar}	0		m
Tebal <i>coating</i> dalam	t _{int}	0		m

Tabel 4.9 Parameter properti pipa (lanjutan)

Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
Densitas <i>corrosion coating</i>	ρ_{cc}	AE	1300	kg/m^3
		FBE	1630	
Densitas <i>concrete coating</i>	ρ_{wc}	3044		kg/m^3
Densitas <i>field joint infill</i>	ρ_{fj}	150		kg/m^3
Densitas <i>steel</i> pipa	ρ_s	7850		kg/m^3
Densitas <i>marine growth</i>	ρ_{mar}	0		kg/m^3
Densitas <i>coating</i> dalam	ρ_{int}	0		kg/m^3
Panjang <i>joint</i> pipa	L_{pj}	12.1		m
Panjang <i>joint cutback</i>	FJ	0.3		m
Percepatan gravitasi	g	9.80665		m/s^2
Densitas air	ρ_w	1025		kg/m^3
Densitas fluida dalam pipa	ρ_c	24.18		kg/m^3

Hasil perhitungan umum pipa yang ditampilkan pada Tabel 4.10 berikut berdasarkan persamaan yang telah sebelumnya dijelaskan pada bab 2 bagian 2.2.1.1.

Tabel 4.10 Hasil perhitungan umum pipa

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan	Persamaan
Ketebalan dinding pipa	t_2	0.0112	m	2.1
Diameter <i>concrete coating</i>	D_c	0.2781	m	2.5
Diameter <i>corrosion coating</i>	D_{cc}	0.2281	m	2.6
Diameter dalam	D_i	0.1937	m	2.4
Diameter total	D_t	0.2781	m	2.2
Momen inersia <i>steel</i>	I_{steel}	4.40E-05	m^4	2.7
Momen inersia <i>concrete coating</i>	I_{conc}	1.61E-04	m^4	2.8
Internal <i>cross section area</i>	A_i	2.95E-02	m^2	2.9
Area <i>steel</i>	A_s	8.23E-03	m^2	2.1

4.2.2 Berat Terendam Pipa

Berat terendam pipa adalah selisih antara berat total pipa meliputi berat *coating*, *marine growth*, *pipeline steel*, dan fluida yang dialirkan oleh pipa dengan *bouyancy* yang terjadi setiap satuan panjangnya. Tabel 4.11 di bawah ini adalah hasil perhitungan berat terendam pipa beserta perhitungan berbagai parameternya (berat bagian pipa dan *bouyancy*).

Tabel 4.11 Hasil perhitungan berat terendam pipa dan parameternya

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan	Persamaan
Massa konten pipa	m_c	0.713	kg/m	2.16
Massa pipa baja	m_{st}	64.645	kg/m	2.13
Massa lapisan anti korosi	m_{cc}	4.227	kg/m	2.14
Massa lapisan <i>concrete</i>	m_{wc}	60.510	kg/m	2.15
Massa struktur pipa	m_{str}	129.382	kg/m	2.12
Massa tambah	m_a	62.261	kg/m	2.17
Gaya apung	F_b	610.571	N/m	2.20
Berat terendam pipa	W_{sub}	659.506	N/m	2.19

4.2.3 Tekanan pada Pipa

Perbandingan nilai tekanan internal dan eksternal pada pipa bawah laut akan menentukan persamaan untuk analisis *local buckling* dalam hal beban kombinasi. Tekanan internal yang digunakan adalah tekanan yang berasal dari tekanan desain pipa, sehingga besarnya tekanan internal pipa adalah 4.31E+06 Pa. Persamaan yang digunakan untuk menghitung tekanan eksternal adalah persamaan 2.21:

$$P_e = h_t \cdot g \cdot \rho_w$$

Nilai kedalaman total perairan merupakan penjumlahan dari kedalaman perairan dan ketinggian pasang air laut. Hasil tekanan eksternal pipa berdasarkan persamaan di atas adalah 6.04E+05 Pa.

4.2.4 Massa Efektif Pipa

Massa efektif pipa adalah jumlah dari massa seluruh struktur pipa ditambah dengan massa fluida yang dialirkan dan massa tambah. Massa struktur pipa dan fluida yang mengalir di dalamnya didapatkan dari perhitungan berat terendam pipa pada subbab 4.2.2. Persamaan yang digunakan untuk menghitung massa efektif pipa adalah persamaan 2.11 dan hasil yang didapat adalah 192.355 kg/m.

4.3 Arus dan Gelombang

4.3.1 Arus

Arus yang dianalisis adalah arus yang arahnya tegak lurus dengan pipa (sudut 90°), karena arah tersebut memiliki pengaruh beban arus yang paling besar

dibandingkan dengan arah yang lain. Aliran arus yang digunakan pada penelitian ini adalah *inner zone*. Zona ini memiliki nilai kelajuan arus rata – rata yang berbeda searah dengan arah horizontal dan kecepatan arus beserta arahnya merupakan fungsi dari geometri dasar laut.

Hal yang harus dipertimbangkan dalam menghitung kecepatan arus yang bekerja pada pipa adalah kekasaran dasar laut (z_o) karena letak pipa dekat dengan dasar laut dan *gap* (e) karena pipa meletak pada dasar laut dengan kondisi *freespan*. Nilai kekasaran dasar laut didapatkan dari Tabel 2.2 sesuai dengan jenis tanah pada posisi pipa meletak. Kecepatan arus pada kedalaman pipa dihitung menggunakan persamaan 2.51. Hasil perhitungan yang didapat untuk periode arus 1 tahunan dan 100 tahunan sebesar 0.24 m/s.

4.3.2 Kecepatan Partikel Gelombang

Kecepatan partikel yang dipengaruhi oleh gelombang mempunyai beberapa tahapan untuk menghitungnya. Pertama adalah menghitung spektra gelombang. Persamaan spektra yang sering digunakan untuk perairan laut tertutup seperti Indonesia adalah spektra JONSWAP, tetapi spektra tersebut memiliki kekurangan yaitu hasil yang didapatkan berlebihan untuk perairan Indonesia yang tidak seganas *North Sea*, sehingga untuk mengatasinya dipilih faktor *peak-enhancement* yang lebih kecil. Persamaan faktor tersebut dipilih berdasarkan besarnya nilai distribusi. Nilai angka gelombang (k) didapat melalui iterasi pada Lampiran B.

Langkah selanjutnya adalah mentransformasikan kecepatan partikel gelombang dari permukaan hingga kedalaman tempat pipa meletak. Kondisi yang diperhitungkan adalah kondisi satu tahunan dan seratus tahunan. Persamaan faktor *peak-enhancement* dipilih dengan mempertimbangkan nilai fungsi distribusi gelombang. Setelah melakukan perhitungan spektra gelombang, selanjutnya adalah menghitung varian *spectral momen* yang hasilnya disajikan pada Tabel 4.12. Nilai tersebut merupakan salah satu parameter untuk menghitung kecepatan arus signifikan pada kedalaman pipa (U_s).

Tabel 4.12 Varian *spectral moment*

Notasi	Nilai	
	1 tahun	100 tahun
M_0	0.239	0.937
M_1	0.330	0.774
M_2	0.586	0.863
M_4	3.556	3.503

Selanjutnya adalah menghitung kecepatan aliran gelombang signifikan pada kedalaman pipa dan *mean zero up-crossing period*. Hasil dari perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Kecepatan partikel gelombang

Parameter	Notasi	Nilai		Satuan	Persamaan
		1 tahun	100 tahun		
Kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_s	0.978	1.936	m/s	2.35
<i>Mean zero up-crossing period</i>	T_u	4.014	6.546	s	2.36

Kecepatan partikel air akan berkurang karena adanya pengaruh dari arah persebaran gelombang yang direpresentasikan dalam bentuk faktor reduksi. Faktor reduksi tersebut didapat menggunakan grafik pada Gambar 2.3. Tabel 4.14 merupakan hasil kecepatan partikel gelombang setelah adanya pengaruh faktor reduksi.

Tabel 4.14 Kecepatan partikel gelombang setelah pengaruh faktor reduksi

Parameter	Notasi	Nilai		Satuan	Persamaan
		1 tahun	100 tahun		
Kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_w	0.9292	1.8388	m/s	2.37
<i>Mean zero up-crossing period</i>	T_u	4.0144	6.5463	s	2.36

4.4 Interaksi Pipa dengan Tanah

4.4.1 Kekakuan Tanah

Jenis tanah yang dianalisa sesuai dengan data adalah *clay very soft*, sehingga parameter – parameter yang diperlukan untuk menghitung kekakuan tanah bisa

ditentukan menggunakan DNV-RP-F-105 (2006). Faktor kekakuan dinamis dan statis untuk jenis tanah *clay* diambil dari Tabel 2.11. Parameter yang digunakan untuk perhitungan kekakuan tanah dari tabel tersebut adalah koefisien kekakuan tanah vertikal dan lateral. Parameter lain adalah rasio massa spesifik Kekakuan dinamis vertikal tanah dihitung menggunakan persamaan 2.84 dan hasilnya adalah $7.78\text{E}+05 \text{ N/m}^2$. Sedangkan kekakuan dinamis lateral tanah dihitung menggunakan persamaan 2.85 dan didapat hasil sebesar $5.90\text{E}+05 \text{ N/m}^2$.

4.5 Parameter Hidrodinamika

4.5.1 Parameter Stabilitas

Parameter stabilitas yang dihitung meliputi massa efektif pipa dan modal rasio *damping* total. Modal rasio *damping* total merupakan penjumlahan dari *damping* struktur, *damping* hidrodinamis dan *soil damping*. Setiap nilai *damping* didapatkan berdasarkan DNV-RP-F105 (2006) dan telah dijelaskan pada subbab 2.2.4.1. Parameter lain untuk menghitung parameter stabilitas seperti *safety factor* didapatkan dari Tabel 2.3 dalam subbab 2.2.4.3. Hasil perhitungan parameter stabilitas (K_s) menggunakan persamaan 2.59 adalah 0.457. Selanjutnya harus dihitung nilai parameter stabilitas karena pertimbangan *safety factor*, karena nilai *safety factor* yang digunakan besarnya satu maka besarnya parameter stabilitas karena pengaruh *safety factor* adalah 0.457.

4.5.2 Current Flow Ratio

Current flow ratio nilainya dipengaruhi oleh periode ulang 100 tahun untuk arus laut dan periode ulang signifikan 1 tahun untuk arus laut. *Current flow ratio* juga merupakan salah satu parameter untuk melakukan *screening* terhadap frekuensi natural. *Current flow ratio* dihitung menggunakan persamaan 2.58 dan hasilnya adalah 0.207.

4.5.3 Reduce Velocity

Nilai *reduce velocity* pada pipa bawah laut memiliki dua nilai untuk masing – masing arah *in-line* dan *cross-flow*. Reduce velocity pada arah *in-line* dipengaruhi oleh nilai parameter stabilitas (K_{sd}). Berdasarkan perhitungan sebelumnya, nilai parameter stabilitas yang didapatkan adalah 0.457 ($0,4 < K_{sd} < 1,6$), sehingga persamaan yang digunakan untuk menghitung *reduce velocity* adalah persamaan

2.69. Nilai *reduce velocity* untuk arah *cross-flow* dipengaruhi oleh *trenching* dan perbandingan *gap* dengan diameter total pipa. Persamaan untuk menghitung faktor reduksi karena keberadaan pipa dekat dengan *seabed* adalah persamaan 2.74, karena nilai perbandingan *gap* dengan diameter total pipa lebih dari 0.8. Sedangkan faktor reduksi karena pengaruh *trenching* dihitung menggunakan persamaan 2.75 dengan parameter pada persamaan 2.76. Hasil perhitungan *reduce velocity* arah *in-line* ($V_{R,onset}^{IL}$) berdasarkan persamaan 2.69 adalah 0.755 dan *reduce velocity* arah *cross-flow* ($V_{R,onset}^{CF}$) berdasarkan persamaan 2.73 adalah 2.143. Penjelasan lebih detil tentang *reduce velocity* terlampir pada Lampiran E.

4.6 Analisis Struktural Pipa

4.6.1 Concrete Stiffness Factor (CSF)

Concrete Stiffness Factor (CSF) merupakan salah satu parameter untuk menghitung frekuensi natural pipa dan *relative soil stiffness parameter*. Nilai CSF sendiri dipengaruhi oleh *empirical parameter concrete* (k_c) yang nilainya bergantung pada jenis *concrete* yang digunakan. Berdasarkan data pada penelitian ini, *concrete* yang digunakan adalah jenis asphalt yang memiliki nilai k_c 0.33 dengan kekuatan konstruksi *concrete* (f_{cn}) 40-45 MPa sesuai dengan jenis *concrete* dan diambil nilai 45 MPa. Nilai CSF dihitung menggunakan persamaan 2.79 dan hasilnya adalah 0.212.

4.6.2 Panjang Freespan Efektif

Perhitungan panjang *span* efektif dilakukan menggunakan iterasi karena panjang *freespan* aktual dari hasil survei belum ada karena pipa yang dianalisa merupakan pipa baru. Persamaan yang digunakan untuk menghitung panjang efektif pipa adalah persamaan 2.23 dan 2.24 bergantung pada besarnya nilai *relative soil stiffness parameter* (β). Nilai β arah *in-line* menggunakan parameter kekakuan dimanis lateral tanah, sedangkan arah *cross-flow* menggunakan kekakuan dinamis vertikal tanah. Tabel 4.15 dan Tabel 4.16 merupakan tabel iterasi panjang *freespan* efektif untuk masing – masing arah *in-line* dan *cross-flow*.

Tabel 4.15 Iterasi panjang *freespan* efektif arah *in-line*

L (m)	β	L_{eff}/L	L_{eff} (m)
3	0.636	3.373	10.118
3.5	0.904	2.992	10.473
4	1.136	2.720	10.878
4.5	1.340	2.513	11.308
5	1.523	2.350	11.750
5.5	1.689	2.218	12.197
6	1.840	2.108	12.645
6.5	1.979	2.014	13.093
7	2.108	1.934	13.538
7.5	2.228	1.864	13.980
8	2.340	1.802	14.419
8.5	2.445	1.747	14.853
9	2.544	1.698	15.284
9.5	2.638	1.654	15.712
10	2.727	1.619	16.193
10.5	2.812	1.589	16.686
11	2.893	1.562	17.180
11.5	2.970	1.537	17.676
12	3.044	1.514	18.172
12.5	3.115	1.494	18.669
13	3.183	1.474	19.167
13.5	3.249	1.457	19.665
14	3.312	1.440	20.163
14.5	3.373	1.425	20.661
15	3.432	1.411	21.159

Tabel 4.16 Iterasi panjang *freespan* efektif arah *cross-flow*

L (m)	β	L_{eff}/L	L_{eff} (m)
3	0.756	3.192	9.576
3.5	1.024	2.845	9.959
4	1.256	2.595	10.379
4.5	1.460	2.404	10.817
5	1.643	2.253	11.263
5.5	1.809	2.129	11.711
6	1.960	2.027	12.159
6.5	2.099	1.939	12.605

Tabel 4.16 Iterasi panjang *freespan* efektif arah *cross-flow* (lanjutan)

L (m)	β	L_{eff}/L	L_{eff} (m)
7	2.228	1.864	13.047
7.5	2.348	1.798	13.485
8	2.460	1.740	13.920
8.5	2.565	1.688	14.350
9	2.665	1.642	14.776
9.5	2.759	1.608	15.276
10	2.848	1.577	15.770
10.5	2.932	1.549	16.265
11	3.013	1.524	16.761
11.5	3.090	1.501	17.258
12	3.164	1.480	17.755
12.5	3.235	1.460	18.253
13	3.303	1.442	18.751
13.5	3.369	1.426	19.249
14	3.432	1.411	19.748
14.5	3.493	1.396	20.246
15	3.552	1.383	20.744

4.6.3 Gaya Aksial Efektif

Gaya aksial efektif merupakan salah satu parameter yang mempengaruhi *static deflection*. Persamaan yang digunakan untuk menghitung gaya aksial efektif adalah persamaan 2.83:

$$S_{eff} = H_{eff} - (1 - 2\nu)\Delta P_i \frac{\pi}{4}(D_i)^2 - \alpha_e \Delta T E A_s$$

Nilai *effective lay tension* merupakan nilai *lay tension* saat proses *instalasi*. Nilainya dianggap bernilai 0 N karena tidak ada referensi yang sesuai dengan besarnya nilai tersebut pada data. Perbedaan tekanan merupakan selisih antara tekanan internal dan eksternal yang besarnya 4.31E+06 Pa. Nilai perbedaan temperatur merupakan selisih antara temperatur di dalam pipa dan temperatur lingkungan di luar pipa (25°C). Nilai gaya aksial efektif yang didapat adalah -4.37E+04 N.

4.6.4 Critical Buckling Load

Critical buckling load merupakan faktor yang mempengaruhi frekuensi natural, nilainya dihitung menggunakan persamaan 2.82:

$$P_{cr} = (1 + CSF)C_2\pi^2EI_{steel}/L_{eff}^2$$

Salah satu parameter yang diperlukan adalah C_2 yang nilainya didapat dari *boundary condition*. Panjang *span* yang digunakan dalam perhitungan adalah panjang *span* aktual sesuai dengan penjelasan pada DNV-OS-F105 (2006). Nilai *critical buckling load* berubah – ubah seiring dengan iterasi panjang aktual *freespan*. Nilai *critical buckling load* berdasarkan panjang *span* disajikan pada Tabel 4.17 dan Tabel 4.18. *Critical buckling load* arah *in-line* dan *cross-flow* bernilai sama.

4.6.5 Static Deflection

Static deflection merupakan parameter yang mempengaruhi nilai frekuensi natural pipa dan nilainya dihitung menggunakan persamaan 2.81. Nilainya dipengaruhi oleh panjang aktual *freespan* dan beban defleksi. Beban defleksi untuk arah *in-line* adalah gaya *drag*, sedangkan untuk arah *cross-flow* adalah berat terendam pipa. Detail perhitungan gaya *drag* beserta perhitungan koefisien *drag* dapat dilihat pada Lampiran E. Hasil perhitungan *static deflection* untuk tiap panjang *span* disajikan pada Tabel 4.17 dan Tabel 4.18 untuk masing – masing arah *in-line* dan *cross-flow*.

4.6.6 Frekuensi Natural Pipa

Menghitung frekuensi natural pipa baik arah *in-line* maupun *cross-flow* menggunakan persamaan 2.78 dan nilainya berubah seiring dengan iterasi panjang aktual *freespan*. Koefisien $C_1 - C_3$ merupakan koefisien *boundary condition* yang didapat dari Tabel D.1 pada lampiran D dengan pilihan tumpuan *pinned-pinned*. Tabel 4.17 dan Tabel 4.18 masing – masing merupakan tabel hasil iterasi frekuensi natural terhadap panjang aktual *freespan* arah *in-line* dan *cross-flow*.

Tabel 4.17 *Critical buckling load, static deflection dan frekuensi natural arah in-line*

L (m)	P_{cr} (N)	δ (m)	f_n (Hz)
3	1.21E+07	0.00011	41.722
3.5	8.90E+06	0.00021	30.633
4	6.81E+06	0.00036	23.435
4.5	5.38E+06	0.00058	18.501
5	4.36E+06	0.00088	14.971
5.5	3.60E+06	0.00129	12.360
6	3.03E+06	0.00184	10.374
6.5	2.58E+06	0.00254	8.828
7	2.22E+06	0.00342	7.601
7.5	1.94E+06	0.00452	6.612
8	1.70E+06	0.00587	5.802
8.5	1.51E+06	0.00751	5.131
9	1.35E+06	0.00947	4.568
9.5	1.21E+06	0.01180	4.092
10	1.09E+06	0.01455	3.686
10.5	9.89E+05	0.01776	3.336
11	9.01E+05	0.02149	3.033
11.5	8.24E+05	0.02579	2.768
12	7.57E+05	0.03073	2.536
12.5	6.98E+05	0.03637	2.331
13	6.45E+05	0.04278	2.149
13.5	5.98E+05	0.05004	1.987
14	5.56E+05	0.05822	1.842
14.5	5.18E+05	0.06741	1.712
15	4.84E+05	0.07770	1.595

Tabel 4.18 *Critical buckling load, static deflection dan frekuensi natural arah cross-flow*

L (m)	P_{cr} (N)	δ (m)	f_n (Hz)
3	1.21E+07	0.000	41.722
3.5	8.90E+06	0.000	30.633
4	6.81E+06	0.000	23.435
4.5	5.38E+06	0.000	18.501
5	4.36E+06	0.000	14.971
5.5	3.60E+06	0.001	12.360
6	3.03E+06	0.001	10.374

Tabel 4.18 *Critical buckling load, static deflection dan frekuensi natural arah cross-flow (lanjutan)*

L (m)	P_{cr} (N)	δ (m)	f_n (Hz)
6.5	2.58E+06	0.001	8.828
7	2.22E+06	0.002	7.601
7.5	1.94E+06	0.003	6.612
8	1.70E+06	0.003	5.802
8.5	1.51E+06	0.004	5.131
9	1.35E+06	0.005	4.569
9.5	1.21E+06	0.007	4.093
10	1.09E+06	0.008	3.687
10.5	9.89E+05	0.010	3.338
11	9.01E+05	0.012	3.035
11.5	8.24E+05	0.014	2.771
12	7.57E+05	0.017	2.540
12.5	6.98E+05	0.020	2.336
13	6.45E+05	0.024	2.156
13.5	5.98E+05	0.028	1.996
14	5.56E+05	0.032	1.853
14.5	5.18E+05	0.038	1.726
15	4.84E+05	0.043	1.612

4.7 Screening Frekuensi Natural

Screening frekuensi natural pipa dilakukan berdasarkan DNV-RP-F-105 (2006) untuk arah *in-line* dan *cross-flow*. Nilai *safety factor* arah *in-line* dan *cross-flow* digunakan sesuai dengan Tabel D.2 pada lampiran D. *Screening* dilakukan sesuai dengan persamaan 2.54 untuk arah *in-line* dan persamaan 2.55 untuk arah *cross-flow*. Tabel 4.19 dan Tabel 4.20 merupakan hasil *screening* untuk masing – masing arah *in-line* dan *cross-flow*. Pada kedua tabel tersebut terdapat keterangan “LOLOS” yang berarti panjang *freespan* tersebut lolos *screening* dan “TIDAK LOLOS” yang berarti panjang *freespan* tersebut tidak lolos *screening*, dan panjang *span* yang tidak lolos *screening* harus dianalisis kekuatannya terhadap beban siklik. Tetapi pada tugas akhir ini tidak dibahas tentang analisa kelelahan.

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,100tahun}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D_t} \cdot \left(1 - \frac{L/D_t}{250}\right) \cdot \frac{1}{\alpha}$$

$$X > Y$$

dengan:

$$X = \frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} \text{ (Hz)}$$

$$Y = \frac{U_{c,100\text{tahun}}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D_t} \cdot \left(1 - \frac{L/D_t}{250}\right) \cdot \frac{1}{\alpha} \text{ (Hz)}$$

Tabel 4.19 *Screening in-line*

L (m)	fn (Hz)	X	Y	Keterangan
3	41.722	29.801	5.338	LOLOS
3.5	30.633	21.881	5.298	LOLOS
4	23.435	16.740	5.258	LOLOS
4.5	18.501	13.215	5.218	LOLOS
5	14.971	10.694	5.178	LOLOS
5.5	12.360	8.829	5.138	LOLOS
6	10.374	7.410	5.097	LOLOS
6.5	8.828	6.306	5.057	LOLOS
7	7.601	5.430	5.017	LOLOS
7.5	6.612	4.723	4.977	TIDAK LOLOS
8	5.802	4.144	4.937	TIDAK LOLOS
8.5	5.131	3.665	4.897	TIDAK LOLOS
9	4.568	3.263	4.857	TIDAK LOLOS
9.5	4.092	2.923	4.817	TIDAK LOLOS
10	3.686	2.633	4.776	TIDAK LOLOS
10.5	3.336	2.383	4.736	TIDAK LOLOS
11	3.033	2.166	4.696	TIDAK LOLOS
11.5	2.768	1.977	4.656	TIDAK LOLOS
12	2.536	1.811	4.616	TIDAK LOLOS
12.5	2.331	1.665	4.576	TIDAK LOLOS
13	2.149	1.535	4.536	TIDAK LOLOS
13.5	1.987	1.419	4.496	TIDAK LOLOS
14	1.842	1.316	4.455	TIDAK LOLOS
14.5	1.712	1.223	4.415	TIDAK LOLOS
15	1.595	1.139	4.375	TIDAK LOLOS

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100\text{tahun}} + U_{w,1\text{tahun}}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D_t}$$

$$P > Q$$

dengan:

$$P = \frac{f_{n,CF}}{Y_{CF}} \text{ (Hz)}$$

$$Q = \frac{U_{c,100\text{tahun}} + U_{w,1\text{ tahun}}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D_t} \text{ (Hz)}$$

Tabel 4.20 *Screening cross-flow*

L (m)	fn (Hz)	P	Q	Keterangan
3	41.722	29.801	1.966	LOLOS
3.5	30.633	21.881	1.966	LOLOS
4	23.435	16.740	1.966	LOLOS
4.5	18.501	13.215	1.966	LOLOS
5	14.971	10.694	1.966	LOLOS
5.5	12.360	8.829	1.966	LOLOS
6	10.374	7.410	1.966	LOLOS
6.5	8.828	6.306	1.966	LOLOS
7	7.601	5.430	1.966	LOLOS
7.5	6.612	4.723	1.966	LOLOS
8	5.802	4.144	1.966	LOLOS
8.5	5.131	3.665	1.966	LOLOS
9	4.569	3.263	1.966	LOLOS
9.5	4.093	2.924	1.966	LOLOS
10	3.687	2.634	1.966	LOLOS
10.5	3.338	2.384	1.966	LOLOS
11	3.035	2.168	1.966	LOLOS
11.5	2.771	1.979	1.966	LOLOS
12	2.540	1.814	1.966	TIDAK LOLOS
12.5	2.336	1.669	1.966	TIDAK LOLOS
13	2.156	1.540	1.966	TIDAK LOLOS
13.5	1.996	1.426	1.966	TIDAK LOLOS
14	1.853	1.324	1.966	TIDAK LOLOS
14.5	1.726	1.233	1.966	TIDAK LOLOS
15	1.612	1.151	1.966	TIDAK LOLOS

Hasil akhir dari *screening* frekuensi natural adalah panjang *freespan* maksimal yang diizinkan dari kedua tabel diatas kemudian dibandingkan dan diambil yang paling pendek dari hasil keduanya. Berdasarkan hasil *screening* frekuensi natural yang sudah dilakukan panjang maksimal *freespan* arah *in-line* adalah 7 meter dan panjang *freespan* maksimal arah *cross-flow* adalah 11.5 meter.

Panjang maksimal yang digunakan adalah panjang maksimal untuk kondisi *in-line* yaitu 7 meter.

4.8 Bending Moment

Bending moment yang terjadi pada pipa bawah laut yang mengalami *freespan* dapat disebabkan oleh beban fungsional dan beban lingkungan (*in-line* dan *cross-flow*).

4.8.1 Stress Range

Stress range merupakan salah satu hal yang menyebabkan terjadinya VIV. Parameter yang harus diketahui terlebih dahulu adalah *stress amplitude*. Besarnya nilai *stress amplitude* untuk arah *in-line* dan *cross-flow* sama. Panjang *span* yang digunakan adalah panjang yang didapatkan dari hasil *screening* frekuensi natural. Nilai koefisien *boundary condition* didapatkan sesuai dengan Tabel D.1 pada lampiran D. *Stress amplitude* dihitung menggunakan persamaan 2.77:

$$A_{IL/CF} = C_4(1 + CSF) \frac{D_t(D_0 - t_{nom})E}{L^2}$$

Panjang *span* yang digunakan adalah 7 meter sesuai dengan panjang maksimal yang diizinkan setelah *screening* frekuensi natural. Hasil perhitungan *stress amplitude* berdasarkan persamaan diatas adalah 1.45E+09 Pa.

Stress range arah *in-line* dihitung menggunakan persamaan 2.66:

$$S_{IL} = 2 \cdot A_{IL} \cdot (A_v/D) \cdot \psi_{a,IL} \cdot \gamma_s$$

Parameter selanjutnya yang harus diketahui adalah faktor koreksi dari rasio aliran arus dan amplitudo respon *in-line* VIV terhadap *reduced velocity* yang didapat menggunakan Gambar 2.7. Amplitudo respon *in-line* VIV (A_v/D) bernilai nol karena nilai *reduce velocity* kurang dari nilai minimal grafik parameter stabilitas, sedangkan *safety factor* untuk parameter VIV didapatkan dari Gambar 2.3. Perhitungan lebih lengkap terlampir pada Lampiran G. Sehingga besarnya *stress range* arah *in-line* adalah 0 Pa.

Stress range arah *cross-flow* dihitung menggunakan persamaan 2.71:

$$S_{CF} = 2 \cdot A_{CF} \cdot (A_z/D) \cdot R_k \cdot \gamma_s$$

Parameter yang harus diketahui untuk menghitung *stress range* arah *cross-flow* adalah amplitudo *cross-flow* VIV (A_z/D) didapat menggunakan Gambar 2.8. Parameter ini sudah dihitung pada subbab perhitungan gaya *drag* y dan besarnya adalah 0.061. Parameter lain yang diperlukan yaitu cek nilai parameter stabilitas untuk mendapatkan nilai amplitudo faktor reduksi untuk *damping*. Nilai *stress range* arah *cross-flow* berdasarkan persamaan 2.71 adalah 2.15E+08 Pa.

4.8.2 Environmental Stress Maksimal

1. In-Line

Perhitungan *environmental stress* dilakukan dengan beberapa tahap. Pertama adalah menghitung momen akibat gaya *drag* menggunakan persamaan 2.98. Parameter panjang yang digunakan adalah panjang aktual pipa yang diizinkan setelah dilakukan *screening* frekuensi natural. Besarnya gaya *drag* yang bekerja pada pipa juga harus disesuaikan dengan panjang pipa yang digunakan, pada perhitungan ini panjang yang digunakan adalah 7 meter. Sehingga gaya *drag* yang bekerja besarnya adalah 8.29E+03 N dan momen yang dihasilkan besarnya adalah 7.36E+03 Nm.

Tahap kedua setelah mengetahui momen akibat gaya *drag* adalah menghitung tegangan akibat beban arus langsung yang dipengaruhi oleh momen akibat gaya *drag* dan persamaan yang digunakan adalah persamaan 2.97. Berdasarkan persamaan tersebut tegangan akibat arus langsung yang dihasilkan besarnya 1.74E+07 Pa.

Tahap terakhir adalah menghitung *environmental stress* arah *in-line* dengan parameter – parameter yang sudah dihitung sebelumnya menggunakan persamaan 2.95:

$$\sigma_E = \frac{1}{2} \max \left\{ S_{IL}; 0,4 S_{CF} \frac{A_{IL}}{A_{CF}} \right\} + \sigma_{FM}$$

Besarnya nilai *environmental stress* arah *in-line* berdasarkan persamaan di atas adalah 6.03E+07 Pa.

2. Cross-Flow

Besarnya nilai maksimal *environmental stress* arah *cross-flow* merupakan setengah dari nilai *stress range* arah *cross-flow* (persamaan 2.96). Sehingga nilai *environmental stress* arah *cross-flow* adalah 1.07E+08 Pa.

4.8.3 Perhitungan *Bending Moment*

Momen *bending* yang terjadi dapat melalui dua arah, momen *bending* arah vertikal dan horizontal. Momen *bending* arah vertikal diakibatkan oleh beban fungsional yaitu berat terendam pipa. Momen akibat beban fungsional dihitung berdasarkan tumpuan yang digunakan dan persamaan yang digunakan adalah 2.92. Momen *bending* arah vertikal disebabkan juga oleh adanya gerakan *cross-flow* (*environmental stress* arah *cross-flow*) yang dapat dihitung menggunakan persamaan 2.93.

$$M_E = \sigma_E \frac{2I_{steel}}{D_0 - t_{nom}}$$

Hasil perhitungan momen *bending* arah vertikal disajikan pada Tabel 4.21 dan perhitungan lebih lengkap terlampir pada Lampiran H.

Tabel 4.21 Momen *bending* arah vertikal

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Bending moment akibat beban fungsional	M_F	28276.3	Nm
<i>Bending moment cross-flow</i>	$M_{E(CF)}$	45779.89	Nm

Momen *bending* arah horizontal dipengaruhi oleh *environmental stress* arah *in-line*. Persamaan yang digunakan untuk menghitung momen *bending* arah *in-line* adalah persamaan 2.93, hasilnya adalah 2.57E+04 Nm.

Setelah momen *bending* vertikal dan horizontal diketahui, selanjutnya adalah menghitung momen *bending* total. Parameter yang harus diketahui terlebih dahulu adalah faktor akibat beban kombinasi, meliputi faktor kondisi beban pada Tabel 2.13 dan faktor pembebanan untuk kombinasi beban pada Tabel 2.12. Faktor yang digunakan tertera pada lampiran H Tabel H.3 dan Tabel H.4. Persamaan yang digunakan untuk menghitung momen *bending* total adalah persamaan 2.94:

$$M_{Sd} = \sqrt{(M_F \gamma_F \gamma_C)^2 + (M_{E(CF)} \gamma_E)^2 + (M_{E(IL)} \gamma_E)^2}$$

Momen *bending* total berdasarkan persamaan di atas hasilnya adalah 9.86E+4 Nm.

4.9 Cek ULS Menggunakan DNV-OS-F-101

4.9.1 Denote Plastic Capacities

Denote plastic capacities yang dihitung adalah *plastic moment resistance* (persamaan 102) dan *plastic axial force resistance* (persamaan 103). Nilai ini merupakan parameter untuk cek *local buckling* menggunakan *Load Controlled condition* (LC condition). Sesuai dengan DNV-OS-F101 (2013), untuk menghitung *denote plastic capacities* terlebih dahulu harus menghitung nilai karakteristik kekuatan material. Untuk menghitung nilai karakteristik material, diperlukan nilai *de-rating* terhadap temperatur *yield stress* dan *tensile strength* berdasarkan Gambar 2.9 dan nilai faktor kekuatan material pada Tabel 2.16. Nilai *de-rating yield strength* dan *tensile strength* adalah 30 MPa.

Tabel 4.22 *Denote plastic capacities*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Plastic moment resistance</i>	$M_p (t_2)$	159750.03	Nm
<i>Plastic axial force resistance</i>	$S_p (t_2)$	2413994.8	N

4.9.2 Parameter pada Beban Kombinasi

Parameter pada beban kombinasi meliputi parameter aliran tegangan dan faktor karena efek perbandingan antara diameter nominal pipa dan tebal dinding pipa (faktor tekanan untuk beban kombinasi). Kedua nilai tersebut besarnya dipengaruhi oleh nilai faktor untuk kriteria kombinasi beban (β) dan parameter lain yang telah dihitung sebelumnya. Persamaan yang digunakan adalah persamaan 2.104:

$$\alpha_c = (1 - \beta) + \beta \frac{f_u}{f_y}$$

Hasil perhitungan parameter aliran tegangan adalah 1.136.

Nilai faktor tekanan untuk beban kombinasi dipengaruhi juga oleh tekanan *bursting* dan persamaan yang digunakan untuk menghitungnya adalah 2.105 karena nilai perbandingan antara selisih tekanan internal dan eksternal dengan tekanan *bursting* kurang dari 2/3.

$$\alpha_p = 1 - \beta$$

Nilai faktor tekanan untuk beban kombinasi berdasarkan persamaan diatas adalah 0.551.

4.9.3 Cek ULS

Cek *Ultimate Limit State* (ULS) dilakukan sesuai dengan DNV-OS-F101 (2013) dengan persamaan yang cocok untuk kondisi pipa yang dianalisa, yaitu terpengaruh oleh momen *bending*, *effective axial force* dan tekanan internal lebih besar dari tekanan eksternal. Sehingga persamaan yang digunakan adalah persamaan 2.99:

$$\left\{ \gamma_m \gamma_{sc} \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \gamma_{sc} S_{sd}(P_i)}{\alpha_c S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \frac{P_i - P_e}{\alpha_c P_b(t_2)} \right)^2 \leq 1$$

Cek ULS dilakukan dengan panjang *span* maksimal yang lolos *screening* frekuensi natural kemudian diiterasi untuk mendapatkan nilai maksimal *Unity Check* (UC) dengan catatan panjang tersebut menghasilkan tegangan ekuivalen kurang dari tegangan *buckling* kritis. Nilai faktor tahanan material sesuai dengan kondisi limit ULS pada Tabel 2.14 dan faktor keamanan *resistance* sesuai dengan Tabel 2.15.

Panjang maksimal *freespan* (L= 7m) tidak mengalami *local buckling* karena hasil *Unity Check* (UC) besarnya 0.55 (≤ 1). Panjang maksimal *freespan* yang diizinkan untuk cek ULS didapatkan dengan melakukan iterasi panjang *freespan* untuk menghasilkan resultan momen bending maksimal atau kritis. Hasil panjang *freespan* maksimal yang menghasilkan nilai UC mendekati satu adalah 7.5meter dengan resultan *momen bending* kritis yang dihasilkan adalah 1.06E+05 Nm dan besarnya tegangan ekuivalen kurang dari tegangan *buckling* kritis.

4.10 Tegangan Ekuivalen dan Tegangan Buckling Kritis

4.10.1 Tegangan Ekuivalen (Manual)

Tegangan ekuivalen pada *pipeline* yang mengalami *freespan* merupakan kombinasi dari tegangan *hoop*, tegangan longitudinal dan *tangential shear*. *Tangential shear* pada *pipeline* yang mengalami *freespan* bernilai nol dan dapat diabaikan. Tegangan longitudinal juga merupakan kombinasi dari beberapa

tegangan, yaitu tegangan *thermal*, *poisson*, dan *bending*. Tegangan ekuivalen secara manual dihitung menggunakan persamaan 2.112:

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - \sigma_h \cdot \sigma_L + 3 \cdot \tau_x^2}$$

Hasil nilai *hoop stress* adalah 3.44E+07 Pa dan *longitudinal stress* adalah 3.44E+07 Pa. Sehingga besarnya tegangan ekuivalen untuk panjang maksimal *freespan* 7meter berdasarkan persamaan diatas adalah 1.45E+08 Pa.

4.10.2 Tegangan Ekuivalen (Software)

Menghitung tegangan ekuivalen menggunakan *software* diperlukan untuk melakukan validasi terhadap perhitungan tegangan ekuivalen yang sudah dihitung secara manual dan untuk memvisualisasikan tegangan ekuivalen yang terjadi. Input data struktur pipa, input pembebanan dan hasil analisa lebih lengkap terlampir pada lampiran K.

1. Input Data Struktur Pipa

Input data data yang dilakukan pada bagian *engineering data* dan pemodelan geometri dari struktur pipa yang dianalisis.

Tabel 4.23 Input data pemodelan struktur

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Panjang <i>freespan</i>	L	7	m
Diameter luar pipa nominal	D ₀	0.2191	m
Tebal nominal dinding pipa	t _{nom}	0.0127	m
Densitas steel pipa	ρ _s	7850	kg/m ³
Modulus Young steel	E	2.07E+11	Pa
Koefisien <i>thermal expansion</i>	α _e	1.17E-05	/°C
SMYS	SMYS	360	MPa
SMTS	SMTS	460	MPa

2. Input Pembebanan pada Model

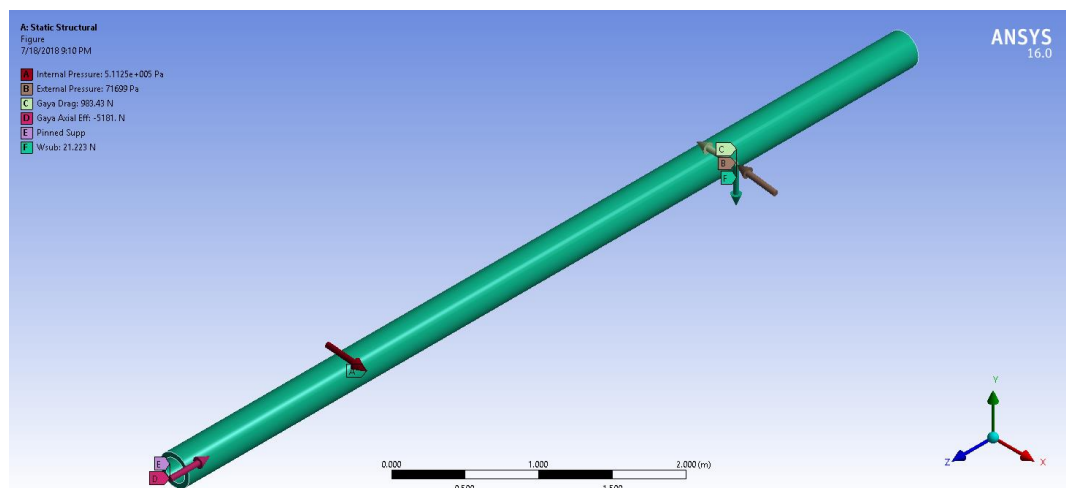
Input beban pada model bertujuan untuk mendapatkan tegangan yang bekerja pada struktur yang dianalisa. Beban yang diinput merupakan beban – beban yang mempengaruhi besarnya tegangan ekuivalen pada persamaan 2.112 dan nilainya berasal dari perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya. Nilai berat terendam pipa yang diinput merupakan berat terendam pipa tanpa

mempertimbangkan berat baja pipa, karena pada input data struktural telah dilakukan input properti baja pipa.

Tabel 4.24 Input pembebanan

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Gaya aksial efektif	S_{eff}	-43678	N
Gaya drag	F_D	8290.69	N/m
Tekanan internal	P_i	4310000	Pa
Tekanan eksternal	P_e	604446	Pa
Berat terendam pipa	W_{sub}	178.92	N
Temperatur Operasi	T	65	°C

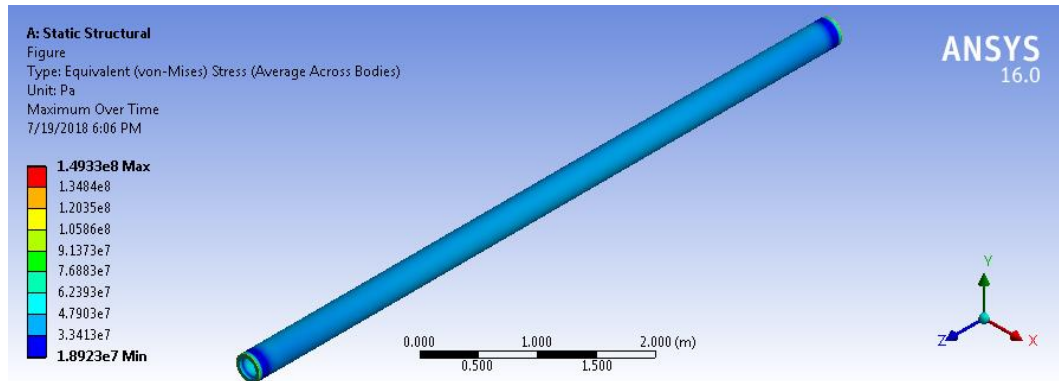
Arah dari pembebanan yang diinput juga sangat penting agar hasil analisa yang didapatkan sesuai. *Boundary condition* yang digunakan adalah *pinned-pinned*. Arah pembebanan yang telah diinput disajikan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Arah pembebanan

3. Hasil Tegangan Ekuivalen

Output solution yang dipilih adalah tegangan ekuivalen untuk mengetahui besarnya tegangan maksimal dan minimal yang terjadi pada struktur pipa yang dianalisis beserta visualisasinya. Berdasarkan hasil analisis menggunakan *software* didapatkan nilai maksimal tegangan ekuivalen yang terjadi adalah $1.49E+8$ Pa.



Gambar 4.2 Hasil Tegangan Ekuivalen

4.10.3 Tegangan Buckling Kritis

Tegangan *buckling* kritis merupakan nilai batas tegangan ekuivalen. Panjang *freespan* yang digunakan merupakan panjang maksimal *freespan* yang diizinkan yaitu 7meter. Persamaan yang digunakan untuk menghitung tegangan *buckling* kritis adalah persamaan 2.111:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{steel}}{A_s L^2}$$

Hasil tegangan *buckling* kritis berdasarkan persamaan diatas adalah 2.23E+08 Pa.

4.10.4 Cek Tegangan

Cek tegangan yang dilakukan adalah validasi tegangan ekuivalen yang dihitung secara manual dan menggunakan *software*. Cek tegangan yang kedua adalah antara tegangan ekuivalen dan tegangan *buckling* kritis, apabila nilai tegangan ekuivalent melebihi tegangan *buckling* kritis, maknanya struktur yang dianalisa mengalami *local buckling*.

Tabel 4.25 Cek tegangan

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Panjang <i>freespan</i>	L	7	m
<i>Equivalent stress</i> (manual)	σ_{eq}	1.45E+08	Pa
<i>Equivalent stress</i> (software)		1.49E+08	
Tegangan <i>Buckling</i> Kritis	σ_{cr}	2.23E+08	Pa
Cek		Memenuhi	

Berdasarkan hasil yang tercantum pada tabel di atas, perhitungan tegangan ekuivalen sudah tervalidasi karena hasil perhitungan manual dan pemodelan

menggunakan *software* sudah mendekati dengan *error* 3%. Sedangkan cek tegangan yang kedua, yaitu cek tegangan ekuivalen dan tegangan *buckling* kritis juga sudah memenuhi kriteria ($\sigma_{eq} < \sigma_{cr}$).

4.10.5 Panjang *Freespan* yang Diizinkan

Setelah mendapatkan beberapa panjang *freespan* maksimal yang diizinkan, tahap selanjutnya adalah membandingkan semua panjang *freespan* dan memilih panjang *freespan* maksimal yang lolos *screening* frekuensi natural dan cek ULS.

Tabel 4.26 Rangkuman panjang *freespan* maksimal

Parameter	Screening frekuensi natural		Cek ULS	Hasil
	<i>in-line</i>	<i>cross-flow</i>		
L (m)	7	11.5	7.5	7

Berdasarkan tabel hasil diatas, dapat disimpulkan apabila panjang maksimal *freespan* yang diizinkan adalah 7 meter. Sedangkan tegangan ekuivalen terbesar terjadi ketika kondisi ULS dengan panjang *span* 7.5meter dan menghasilkan tegangan ekuivalen sebesar 1.62E+08 Pa. Hasil tegangan ekuivalen tersebut masih kurang dari tegangan *buckling* kritisnya yaitu 1.94E+08 Pa (Lampiran J).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berikut adalah beberapa kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan rumusan masalah yang telah terjawab pada bab analisa dan pembahasan:

1. Panjang *freespan* maksimal agar tidak terjadi VIV sesuai dengan DNV-RP-F105 (2006) adalah 7 meter.
2. Panjang *span* maksimal yang diizinkan sesuai dengan kriteria ULS adalah 7.5 meter.

Beberapa panjang *freespan* yang telah didapatkan dipilih panjang *freespan* yang terpendek yaitu 7 meter. Cek tegangan ekuivalen perhitungan manual dan menggunakan *software* sudah mendekati dengan *error* yang terjadi sebesar 3% dan cek tegangan ekuivalen dan tegangan *buckling* kritis juga telah memenuhi, yaitu tegangan ekuivalen lebih kecil dari tegangan *buckling* kritis.

Langkah mitigasi yang harus dilakukan apabila di lapangan terjadi panjang *span* melebihi panjang *span* yang diizinkan (7meter) adalah menambahkan matras untuk jarak *gap* kecil dan menggunakan *mechanical support* untuk jarak *gap* yang cukup besar. Cara mitigasi lain dapat menggunakan *trenching*, tetapi metode tersebut akan membengkakkan biaya instalasi struktur.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya diantaranya adalah:

1. Analisis bisa dilakukan untuk pengaruh keberadaan *span* lain (*multi-span*).
2. Analisis menggunakan *software* dapat dilanjutkan hingga analisa *Ultimate Limit State* (ULS).

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Arif, A. 2008. **Analisis *Freespan* untuk *Pipeline* di Bawah Laut**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan FTSL, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Bai, Yong dan Qiang Bai. 2005. ***Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation***. Oxford, UK: Gulf Professional Publishing Elsevier.
- Bai, Yong. 2001. ***Pipeline and Riser***. Oxford, UK: Elsevier.
- Basir, I.A.M. 2015. **Analisis Tegangan dan Kelelahan Akibat Pengaruh *Vortex Induced Vibration* yang Terjadi pada Lokasi *Crossing Pipelines* Studi Kasus : Kilo Field Milik Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java**. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Braestrup, M. W. (2005). ***Design and Installation of Marine Pipelines***. UK : Blackwell Science Ltd.
- Choi, H. S. 2000. ***Free Spanning Analysis of Offshore Pipelines***. Pergamon Journal of Ocean Engineering 28 : 1325-1338.
- Djarmiko, Eko B. 2012. **Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak**. Surabaya : itspress.
- DNV OS F101. 2013. ***Submarine Pipeline System***. Recommended Practice. Det Norske Veritas.
- DNV RP C205. 2010. ***Environmental Conditions and Environmental Loads***. Recommended Practice. Det Norske Veritas.
- DNV RP F105. 2006. ***Free Spanning Pipeline***. Recommended Practice. Det Norske Veritas.
- Guo, Boyun, S. Song, Chako. J, dan Ali Ghalambor. 2005. ***Offshore Pipeline***. New York: Elsevier.
- Kenny, J. P. dkk. 1993. ***Structural Analysis of Pipeline Spans***. Sheffield : Health and Safety Executive-Offshore Technology Information.

Mouselli, A. H. (1981). *Offshore Pipeline Design, Analysis and Methods*. Oklahoma : PennWell Books.

Putra, S.A. 2014. **Studi Kasus Analisis Vortex Induced Vibration pada Freespan Pipa Pertamina Hulu Energi-Offshore North West Java**. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Soegiono. 2007. **Pipa Laut**. Surabaya : Airlangga University Pres.

LAMPIRAN A

PERHITUNGAN UMUM PIPA

A.1. Perhitungan Massa Efektif Pipa

1. Koefisien massa tambah

Nilai perbandingan *gap* dan diameter total pipa:

$$\frac{e}{D_t} = \frac{1}{0.278} = 3.596$$

maka:

$$C_a = \begin{cases} 0.68 + \frac{1.6}{\left(1 + 5\left(\frac{e}{D_t}\right)\right)} & \text{untuk } \frac{e}{D_t} < 0.8 \\ 1 & \text{untuk } \frac{e}{D_t} \geq 0.8 \end{cases}$$

Nilai koefisien massa tambah (C_a) = 1

2. Massa efektif pipa

$$m_e = \frac{W_{sub} + F_b}{g} + \frac{\pi}{4} (D_t)^2 \cdot \rho_w \cdot C_a$$

$$W_{sub} = 182.881 \quad \text{N/m}$$

$$F_b = 610.817 \quad \text{N/m}$$

$$g = 9.80665 \quad \text{m/s}^2$$

$$D_t = 0.2781 \quad \text{m}$$

$$\rho_w = 1025 \quad \text{kg/m}^3$$

$$C_a = 1$$

$$m_e = 143.196 \quad \text{kg/m}$$

LAMPIRAN B

ARUS DAN GELOMBANG

B.1. Arus pada Kedalaman Pipa

1. Kekasaran dasar laut

Jenis tanah berdasarkan data adalah *very soft clay*, sehingga kekasaran dipilih *silt*.

Tabel B.1. Kekasaran dasar laut yang digunakan

<i>Seabed</i>	<i>Roughness z_0 (m)</i>
Silt	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$
fine sand	$\approx 1 \cdot 10^{-5}$
Medium sand	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$
coarse sand	$\approx 1 \cdot 10^{-4}$
Gravel	$\approx 3 \cdot 10^{-4}$
Pebble	$\approx 2 \cdot 10^{-3}$
Cobble	$\approx 1 \cdot 10^{-2}$
Boulder	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$

2. Kecepatan arus akibat gelombang

a. Parameter spektra JONSWAP

1) Fungsi distribusi

$$\varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}$$

$$1 \text{ tahun} = 4.138$$

$$100 \text{ tahun} = 4.283$$

2) *Peak-enhancement factor*

$$\gamma = \begin{cases} 5 & \varphi \leq 3.6 \\ \exp(5.75 - 1.15\varphi) & 3.6 < \varphi < 5 \\ 1 & \varphi \geq 5 \end{cases}$$

$$1 \text{ tahun} = 2.694$$

$$100 \text{ tahun} = 2.281$$

b. Transformasi gelombang

1) Gelombang 1 tahun

a) Menentukan angka gelombang

Tabel B.2. Iterasi angka gelombang (k) 1 tahunan

k asumsi	h (m)	g (m/s ²)	ω_p (rad/s)	kh	\tanh kh	\coth kh	k	Error
0.0101	57.69	9.81	0.911	0.5827	0.5246	1.9061	0.1612	93.7%
0.1612	57.69	9.81	0.911	9.2986	1.0000	1.0000	0.0846	-90.6%
0.0846	57.69	9.81	0.911	4.8782	0.9999	1.0001	0.0846	0.0%
0.0846	57.69	9.81	0.911	4.8788	0.9999	1.0001	0.0846	0.0%
0.0846	57.69	9.81	0.911	4.8788	0.9999	1.0001	0.0846	0.0%
0.0846	57.69	9.81	0.911	4.8788	0.9999	1.0001	0.0846	0.0%
0.0846	57.69	9.81	0.911	4.8788	0.9999	1.0001	0.0846	0.0%

b) Mengolah spektra gelombang

Tabel B.3 Perhitungan spektra gelombang

ω	ω_p	g	σ	$S_{\eta\eta}(\omega)$	FS	M_0	M_1	M_2	M_4
0.3	0.91	2.694	0.07	0.00	1	0.000	0.00	0.00	0.00
0.32	0.91	2.694	0.07	0.00	4	0.000	0.00	0.00	0.00
0.34	0.91	2.694	0.07	0.00	2	0.000	0.00	0.00	0.00
0.36	0.91	2.694	0.07	0.00	4	0.000	0.00	0.00	0.00
0.38	0.91	2.694	0.07	0.00	2	0.000	0.00	0.00	0.00
0.4	0.91	2.694	0.07	0.00	4	0.000	0.00	0.00	0.00
0.42	0.91	2.694	0.07	0.00	2	0.000	0.00	0.00	0.00
0.44	0.91	2.694	0.07	0.00	4	0.000	0.00	0.00	0.00
0.46	0.91	2.694	0.07	0.00	2	0.000	0.00	0.00	0.00
0.48	0.91	2.694	0.07	0.00	4	0.000	0.00	0.00	0.00
0.5	0.91	2.694	0.07	0.00	2	0.000	0.00	0.00	0.00
0.52	0.91	2.694	0.07	0.00	4	0.001	0.00	0.00	0.00
0.54	0.91	2.694	0.07	0.00	2	0.002	0.00	0.00	0.00
0.56	0.91	2.694	0.07	0.00	4	0.015	0.01	0.00	0.00
0.58	0.91	2.694	0.07	0.01	2	0.019	0.01	0.01	0.00
0.6	0.91	2.694	0.07	0.02	4	0.085	0.05	0.03	0.01
0.62	0.91	2.694	0.07	0.04	2	0.080	0.05	0.03	0.01
0.64	0.91	2.694	0.07	0.07	4	0.273	0.17	0.11	0.05
0.66	0.91	2.694	0.07	0.11	2	0.210	0.14	0.09	0.04

Tabel B.3 Perhitungan spektra gelombang (lanjutan)

ω	ω_p	g	σ	$S_{\eta\eta}(\omega)$	FS	M_0	M_1	M_2	M_4
0.71	0.91	2.694	0.07	0.23	4	0.917	0.65	0.46	0.23
0.76	0.91	2.694	0.07	0.38	2	0.767	0.58	0.44	0.26
0.81	0.91	2.694	0.07	0.62	4	2.499	2.03	1.65	1.08
0.86	0.91	2.694	0.07	1.10	2	2.195	1.89	1.63	1.21
0.91	0.91	2.694	0.09	1.46	4	5.859	5.34	4.87	4.04
0.96	0.91	2.694	0.09	1.20	2	2.397	2.30	2.22	2.05
1.01	0.91	2.694	0.09	0.79	4	3.146	3.18	3.22	3.29
1.06	0.91	2.694	0.09	0.54	2	1.076	1.14	1.21	1.37
1.11	0.91	2.694	0.09	0.42	4	1.677	1.86	2.07	2.56
1.16	0.91	2.694	0.09	0.35	2	0.708	0.82	0.95	1.29
1.21	0.91	2.694	0.09	0.31	4	1.224	1.48	1.80	2.64
1.26	0.91	2.694	0.09	0.27	2	0.530	0.67	0.84	1.34
1.31	0.91	2.694	0.09	0.23	4	0.917	1.20	1.58	2.71
1.36	0.91	2.694	0.09	0.20	2	0.396	0.54	0.73	1.36
1.41	0.91	2.694	0.09	0.17	4	0.683	0.96	1.36	2.71
1.46	0.91	2.694	0.09	0.15	2	0.295	0.43	0.63	1.35
1.51	0.91	2.694	0.09	0.13	4	0.511	0.77	1.17	2.67
1.56	0.91	2.694	0.09	0.11	1	0.111	0.17	0.27	0.66
1.61	0.91	2.694	0.09	0.10	2	0.193	0.31	0.50	1.30
1.66	0.91	2.694	0.09	0.08	3	0.252	0.42	0.69	1.92
1.71	0.91	2.694	0.09	0.07	4	0.293	0.50	0.86	2.51
1.76	0.91	2.694	0.09	0.06	5	0.321	0.56	0.99	3.09
1.81	0.91	2.694	0.09	0.06	6	0.338	0.61	1.11	3.63
1.86	0.91	2.694	0.09	0.05	7	0.347	0.65	1.20	4.16
1.91	0.91	2.694	0.09	0.04	8	0.349	0.67	1.28	4.66
1.96	0.91	2.694	0.09	0.04	9	0.348	0.68	1.34	5.15
2.01	0.91	2.694	0.09	0.03	10	0.342	0.69	1.39	5.61
2.06	0.91	2.694	0.09	0.03	11	0.335	0.69	1.42	6.05
2.11	0.91	2.694	0.09	0.03	12	0.325	0.69	1.45	6.47
2.16	0.91	2.694	0.09	0.02	13	0.315	0.68	1.47	6.87
2.21	0.91	2.694	0.09	0.02	14	0.303	0.67	1.48	7.26
2.26	0.91	2.694	0.09	0.02	15	0.292	0.66	1.49	7.63
2.31	0.91	2.694	0.09	0.02	16	0.280	0.65	1.49	7.98
2.36	0.91	2.694	0.09	0.02	17	0.268	0.63	1.49	8.32
2.41	0.91	2.694	0.09	0.01	18	0.256	0.62	1.49	8.65

Tabel B.3 Perhitungan spektra gelombang (lanjutan)

ω	ω_p	g	σ	$S_{\eta\eta}(\omega)$	FS	M_0	M_1	M_2	M_4
2.46	0.91	2.694	0.09	0.01	19	0.244	0.60	1.48	8.96
2.51	0.91	2.694	0.09	0.01	20	0.233	0.58	1.47	9.26
2.56	0.91	2.694	0.09	0.01	21	0.222	0.57	1.46	9.55
2.61	0.91	2.694	0.09	0.01	22	0.211	0.55	1.44	9.83
2.66	0.91	2.694	0.09	0.01	23	0.201	0.54	1.43	10.10
2.71	0.91	2.694	0.09	0.01	24	0.192	0.52	1.41	10.35
2.76	0.91	2.694	0.09	0.01	25	0.182	0.50	1.39	10.60
2.81	0.91	2.694	0.09	0.01	26	0.174	0.49	1.37	10.84
2.86	0.91	2.694	0.09	0.01	27	0.165	0.47	1.35	11.07
2.91	0.91	2.694	0.09	0.01	28	0.157	0.46	1.33	11.29
2.96	0.91	2.694	0.09	0.01	29	0.150	0.44	1.31	11.51
3.01	0.91	2.694	0.09	0.00	30	0.142	0.43	1.29	11.72
3.06	0.91	2.694	0.09	0.00	31	0.136	0.42	1.27	11.92
3.11	0.91	2.694	0.09	0.00	32	0.129	0.40	1.25	12.11
3.16	0.91	2.694	0.09	0.00	33	0.123	0.39	1.23	12.30
3.21	0.91	2.694	0.09	0.00	34	0.117	0.38	1.21	12.48
3.26	0.91	2.694	0.09	0.00	35	0.112	0.36	1.19	12.66
3.31	0.91	2.694	0.09	0.00	36	0.107	0.35	1.17	12.83
3.36	0.91	2.694	0.09	0.00	37	0.102	0.34	1.15	12.99
3.41	0.91	2.694	0.09	0.00	38	0.097	0.33	1.13	13.15
3.46	0.91	2.694	0.09	0.00	39	0.093	0.32	1.11	13.31
3.51	0.91	2.694	0.09	0.00	40	0.089	0.31	1.09	13.46
3.56	0.91	2.694	0.09	0.00	41	0.085	0.30	1.07	13.61
3.61	0.91	2.694	0.09	0.00	42	0.081	0.29	1.05	13.75
3.66	0.91	2.694	0.09	0.00	43	0.077	0.28	1.04	13.89
3.71	0.91	2.694	0.09	0.00	44	0.074	0.27	1.02	14.02
3.76	0.91	2.694	0.09	0.00	45	0.071	0.27	1.00	14.16
3.81	0.91	2.694	0.09	0.00	46	0.068	0.26	0.98	14.28
3.86	0.91	2.694	0.09	0.00	47	0.065	0.25	0.97	14.41
3.91	0.91	2.694	0.09	0.00	48	0.062	0.24	0.95	14.53
3.96	0.91	2.694	0.09	0.00	49	0.059	0.24	0.93	14.65
4.01	0.91	2.694	0.09	0.00	50	0.057	0.23	0.92	14.76
4.06	0.91	2.694	0.09	0.00	51	0.055	0.22	0.90	14.88
Jumlah						35.878	49.466	87.893	533.381

2) Gelombang 100 tahunan

a) Menentukan angka gelombang

Tabel B.4. Iterasi angka gelombang (k) 100 tahunan

k asumsi i	h (m)	g (m/s ²)	ω_p (rad/s)	kh	$\tanh kh$	$\coth kh$	k	Error
0.2677	57.69	9.807	0.6614	15.444	1.000	1.0000	0.0446	-500.1%
0.0446	57.69	9.807	0.6614	2.5734	0.988	1.0117	0.0451	1.2%
0.0451	57.69	9.807	0.6614	2.6036	0.989	1.0110	0.0451	-0.1%
0.0451	57.69	9.807	0.6614	2.6018	0.989	1.0111	0.0451	0.0%
0.0451	57.69	9.807	0.6614	2.6019	0.989	1.0111	0.0451	0.0%
0.0451	57.69	9.807	0.6614	2.6019	0.989	1.0111	0.0451	0.0%
0.0451	57.69	9.807	0.6614	2.6019	0.989	1.0111	0.0451	0.0%

b) Mengolah spektra gelombang

Tabel B.5 Perhitungan spektra gelombang

ω	ω_p	g	σ	$S_{\eta\eta}(\omega)$	FS	M_0	M_1	M_2	M_4
0.3	0.661	2.281	0.070	0.000	1	0.000	0.000	0.000	0.000
0.32	0.661	2.281	0.070	0.000	4	0.000	0.000	0.000	0.000
0.34	0.661	2.281	0.070	0.000	2	0.000	0.000	0.000	0.000
0.36	0.661	2.281	0.070	0.000	4	0.001	0.000	0.000	0.000
0.38	0.661	2.281	0.070	0.002	2	0.003	0.001	0.000	0.000
0.4	0.661	2.281	0.070	0.011	4	0.042	0.017	0.007	0.001
0.42	0.661	2.281	0.070	0.042	2	0.084	0.036	0.015	0.003
0.44	0.661	2.281	0.070	0.121	4	0.484	0.213	0.094	0.018
0.46	0.661	2.281	0.070	0.270	2	0.539	0.249	0.115	0.024
0.48	0.661	2.281	0.070	0.497	4	1.989	0.958	0.461	0.107
0.5	0.661	2.281	0.070	0.794	2	1.587	0.796	0.399	0.100
0.52	0.661	2.281	0.070	1.137	4	4.546	2.370	1.236	0.336
0.54	0.661	2.281	0.070	1.510	2	3.021	1.635	0.885	0.259
0.56	0.661	2.281	0.070	1.932	4	7.726	4.337	2.435	0.767
0.58	0.661	2.281	0.070	2.468	2	4.935	2.869	1.668	0.564
0.6	0.661	2.281	0.070	3.221	4	12.886	7.749	4.660	1.685
0.62	0.661	2.281	0.070	4.230	2	8.460	5.257	3.267	1.261
0.64	0.661	2.281	0.070	5.250	4	20.998	13.468	8.638	3.554
0.66	0.661	2.281	0.070	5.706	2	11.411	7.547	4.992	2.184

Tabel B.5 Perhitungan spektra gelombang (lanjutan)

ω	ω_p	g	σ	$S_{\eta\eta}(\omega)$	FS	M_0	M_1	M_2	M_4
0.71	0.661	2.281	0.090	4.255	4	17.018	12.107	8.613	4.359
0.76	0.661	2.281	0.090	2.591	2	5.183	3.946	3.004	1.742
0.81	0.661	2.281	0.090	1.873	4	7.491	6.078	4.932	3.247
0.86	0.661	2.281	0.090	1.513	2	3.027	2.607	2.246	1.666
0.91	0.661	2.281	0.090	1.242	4	4.970	4.530	4.128	3.429
0.96	0.661	2.281	0.090	1.017	2	2.034	1.955	1.880	1.737
1.01	0.661	2.281	0.090	0.831	4	3.323	3.361	3.399	3.477
1.06	0.661	2.281	0.090	0.679	2	1.359	1.442	1.531	1.724
1.11	0.661	2.281	0.090	0.557	4	2.228	2.476	2.752	3.400
1.16	0.661	2.281	0.090	0.458	2	0.917	1.065	1.237	1.668
1.21	0.661	2.281	0.090	0.379	4	1.516	1.837	2.225	3.265
1.26	0.661	2.281	0.090	0.315	2	0.630	0.794	1.002	1.594
1.31	0.661	2.281	0.090	0.263	4	1.051	1.378	1.807	3.108
1.36	0.661	2.281	0.090	0.220	2	0.441	0.600	0.817	1.514
1.41	0.661	2.281	0.090	0.186	4	0.743	1.049	1.480	2.948
1.46	0.661	2.281	0.090	0.157	2	0.315	0.460	0.672	1.435
1.51	0.661	2.281	0.090	0.134	4	0.535	0.809	1.223	2.793
1.56	0.661	2.281	0.090	0.114	2	0.114	0.179	0.279	0.680
1.61	0.661	2.281	0.090	0.098	4	0.196	0.316	0.510	1.324
1.66	0.661	2.281	0.090	0.085	2	0.254	0.422	0.700	1.933
1.71	0.661	2.281	0.090	0.073	4	0.293	0.501	0.857	2.511
1.76	0.661	2.281	0.090	0.064	2	0.318	0.560	0.986	3.059
1.81	0.661	2.281	0.090	0.055	4	0.332	0.602	1.091	3.579
1.86	0.661	2.281	0.090	0.048	2	0.339	0.632	1.176	4.073
1.91	0.661	2.281	0.090	0.043	4	0.340	0.650	1.243	4.542
1.96	0.661	2.281	0.090	0.037	2	0.337	0.661	1.297	4.989
2.01	0.661	2.281	0.090	0.033	4	0.331	0.665	1.338	5.413
2.06	0.661	2.281	0.090	0.029	2	0.322	0.664	1.369	5.818
2.11	0.661	2.281	0.090	0.026	4	0.312	0.659	1.392	6.204
2.16	0.661	2.281	0.090	0.023	2	0.301	0.651	1.407	6.573
2.21	0.661	2.281	0.090	0.021	4	0.290	0.640	1.416	6.925
2.26	0.661	2.281	0.090	0.019	2	0.278	0.628	1.420	7.262
2.31	0.661	2.281	0.090	0.017	4	0.266	0.614	1.420	7.584

Tabel B. 5 Perhitungan spektra gelombang (lanjutan)

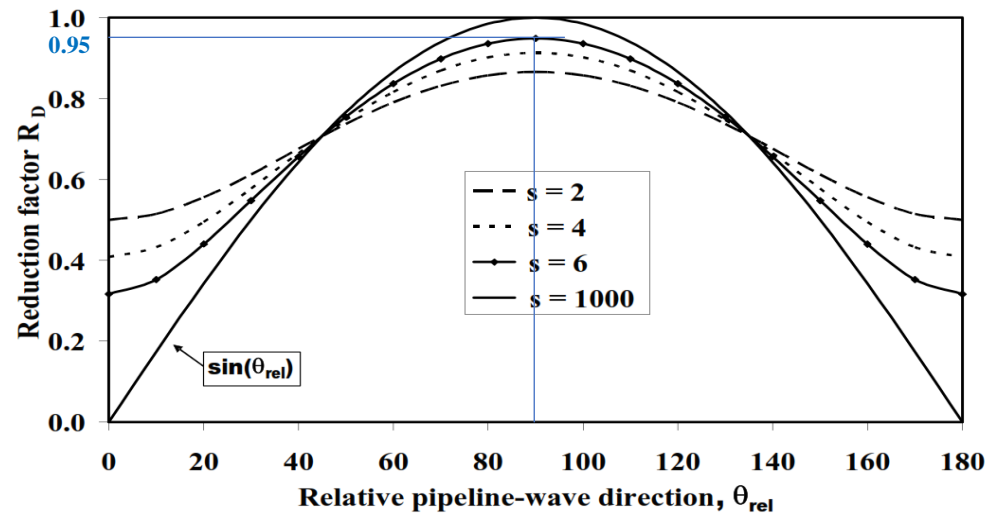
ω	ω_p	g	σ	$S_{\eta\eta}(\omega)$	FS	M_0	M_1	M_2	M_4
2.36	0.661	2.281	0.090	0.015	2	0.254	0.599	1.416	7.893
2.41	0.661	2.281	0.090	0.013	4	0.242	0.584	1.408	8.189
2.46	0.661	2.281	0.090	0.012	2	0.231	0.568	1.399	8.473
2.51	0.661	2.281	0.090	0.011	4	0.220	0.552	1.387	8.746
2.56	0.661	2.281	0.090	0.010	2	0.209	0.536	1.373	9.008
2.61	0.661	2.281	0.090	0.009	4	0.199	0.520	1.358	9.261
2.66	0.661	2.281	0.090	0.008	2	0.189	0.504	1.342	9.503
2.71	0.661	2.281	0.090	0.008	4	0.180	0.488	1.324	9.737
2.76	0.661	2.281	0.090	0.007	2	0.171	0.473	1.306	9.962
2.81	0.661	2.281	0.090	0.006	4	0.163	0.458	1.288	10.179
2.86	0.661	2.281	0.090	0.006	2	0.155	0.443	1.269	10.389
2.91	0.661	2.281	0.090	0.005	4	0.147	0.429	1.249	10.591
2.96	0.661	2.281	0.090	0.005	2	0.140	0.415	1.230	10.786
3.01	0.661	2.281	0.090	0.004	4	0.133	0.402	1.210	10.975
3.06	0.661	2.281	0.090	0.004	2	0.127	0.389	1.191	11.158
3.11	0.661	2.281	0.090	0.004	4	0.121	0.376	1.171	11.335
3.16	0.661	2.281	0.090	0.003	2	0.115	0.364	1.151	11.506
3.21	0.661	2.281	0.090	0.003	4	0.110	0.352	1.132	11.672
3.26	0.661	2.281	0.090	0.003	2	0.105	0.341	1.112	11.832
3.31	0.661	2.281	0.090	0.003	4	0.100	0.330	1.093	11.988
3.36	0.661	2.281	0.090	0.003	2	0.095	0.320	1.074	12.139
3.41	0.661	2.281	0.090	0.002	4	0.091	0.309	1.056	12.286
3.46	0.661	2.281	0.090	0.002	2	0.087	0.300	1.037	12.428
3.51	0.661	2.281	0.090	0.002	4	0.083	0.290	1.019	12.567
3.56	0.661	2.281	0.090	0.002	2	0.079	0.281	1.001	12.701
3.61	0.661	2.281	0.090	0.002	4	0.075	0.272	0.984	12.832
3.66	0.661	2.281	0.090	0.002	2	0.072	0.264	0.967	12.959
3.71	0.661	2.281	0.090	0.002	4	0.069	0.256	0.950	13.082
3.76	0.661	2.281	0.090	0.001	2	0.066	0.248	0.933	13.203

Tabel B. 5 Perhitungan spektra gelombang (lanjutan)

ω	ω_p	g	σ	$S_{\eta\eta}(\omega)$	FS	M_0	M_1	M_2	M_4
3.81	0.661	2.281	0.090	0.001	4	0.063	0.241	0.917	13.320
3.86	0.661	2.281	0.090	0.001	2	0.060	0.233	0.901	13.434
3.91	0.661	2.281	0.090	0.001	4	0.058	0.226	0.885	13.545
3.96	0.661	2.281	0.090	0.001	2	0.055	0.220	0.870	13.654
4.01	0.661	2.281	0.090	0.001	4	0.053	0.213	0.855	13.759
4.06	0.661	2.281	0.090	0.001	1	0.051	0.207	0.840	13.862
Jumlah						134.28	99.55	83.51	117.38

3. Menghitung Arus Akibat Gelombang pada Kedalaman Pipa

a) Menentukan faktor reduksi



Gambar B.1 Grafik Untuk Menentukan Faktor Reduksi

b) Kecepatan partikel gelombang yang digunakan

Tabel B.6 Kecepatan partikel gelombang

Kondisi	U_s	s	R_D	U_W	T_u
1 tahun	0.978	6	0.95	0.929	4.014
100 tahun	1.936	6	0.95	1.839	6.546

4. Kecepatan Arus Total

Tabel B.7 Kecepatan arus total

Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 tahun	100 tahun	
Kecepatan arus <i>steady</i> pada elevasi pipa	U_c	0.2426	0.2426	m/s
Kecepatan arus signifikan normal pada pipa	U_w	0.9292	1.8388	m/s
Kecepatan arus total	U_{tot}	1.1718	2.0813	m/s

LAMPIRAN C

KEKAKUAN TANAH

C.1. Menghitung Kekakuan Tanah

Tabel berikut adalah faktor kekakuan dinamis dan statis yang digunakan berdasarkan data tanah yaitu *clay* dan *very soft*.

Tabel C.1 Faktor kekakuan dinamis dan statis untuk tanah *clay*

<i>Clay type</i>	C_V ($\text{kN/m}^{5/2}$)	C_L ($\text{kN/m}^{5/2}$)	$K_{V,S}$ (kN/m/m)
Very soft	600	500	50-100
Soft	1400	1200	160-260
Firm	3000	2600	500-800
Stiff	4500	3900	1000-1600
Very stiff	11000	9500	2000-3000
Hard	12000	10500	2600-4200

LAMPIRAN D

BOUNDARY CONDITION DAN SAFETY FACTOR

D.1. Boundary Condition

Kondisi batas pada tugas akhir ini adalah *pinned-pinned*, maka koefisien batas sesuai dengan tabel di bawah ini beserta keterangannya.

Tabel D.1 Koefisien batas menurut DNV RP F105 (2006)

	Pinned-Pinned ²⁾	Fixed-Fixed ³⁾	Single span on seabed
C_1	1.57	3.56	3.56
C_2	1.0	4.0	4.0
C_3	0.8 ¹⁾	0.2 ¹⁾	0.4 ¹⁾
C_4	4.93	14.1	Shoulder: $14.1(L/L_{eff})^2$ Mid-span: 8.6
C_5	1/8	1/12	Shoulder: ⁴⁾ $\frac{1}{18(L_{eff}/L)^2 - 6}$ Mid-span: 1/24
C_6	5/384	1/384	1/384
1) Note that $C_3 = 0$ is normally assumed for in-line if the steady current is not accounted for. 2) For pinned-pinned boundary condition L_{eff} is to be replaced by L in the above expressions also for P_{cr} . 3) For fixed-fixed boundary conditions, $L_{eff}/L = 1$ per definition. 4) C_5 shall be calculated using the static soil stiffness in the L_{eff}/L calculation.			

D.2. Safety Factor

Tabel D.2 Safety factor untuk parameter VIV

Safety factor	Safety Class		
	Low	Normal	High
η	1.0	0.5	0.25
γ_k	1.0	1.15	1.30
γ_s	1.3		
$\gamma_{on, IL}$	1.1		
$\gamma_{on, CF}$	1.2		

LAMPIRAN E

PARAMETER HIDRODINAMIKA

E.1. Reduce Velocity

1. In-line

Nilai parameter stabilitas (K_{sd}) = 0.457 ($0.4 < K_{sd} < 1.6$), sehingga persamaan yang digunakan adalah:

$$V_{R,onset}^{IL} = \left(\frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} \right) = 0.755$$

2. Cross-flow

- Nilai perbandingan antara *gap* dan diameter total pipa ($\frac{e}{D_t}$) = 3.596 ($\geq 0,8$), sehingga persamaan koreksi untuk arah *cross-flow* karena letak pipa dekat dengan *seabed* ($\psi_{proxi,onset}$) = 1.
- *Reduction factor* arah *cross flow* karena pengaruh *trench*:

$$\psi_{trench,onset} = 1 + 0,5 \frac{\Delta}{D_t} = 1$$

Digunakan persamaan di atas karena nilai $\frac{\Delta}{D_t} = 0$ ($0 \leq \frac{\Delta}{D_t} \leq 1$)

Sehingga nilai faktor reduksi arah *cross flow* adalah:

$$V_{R,onset}^{CF} = \left(\frac{3\psi_{proxi,onset}\psi_{trench,onset}}{\gamma_{on,CF}} \right) = 2.143$$

E.2. Gaya Drag

1. Menentukan koefisien gaya drag

- a) Koefisien *drag* umum untuk aliran *steady*

Lapisan terluar dari pipa yang dianalisa mempengaruhi nilai kekasaran permukaan pipa (k). Sesuai dengan tabel di bawah ini, nilai $k = 1/300$.

Tabel E.1 Nilai kekasaran permukaan pipa menurut DNV RP F105 (2006)

<i>Pipe surface</i>	<i>k [metres]</i>
Steel, painted	10^{-6}
Steel, un-coated (not rusted)	10^{-5}
Concrete	1/300
Marine growth	1/200 → 1/20

Perbandingan kekasaran permukaan pipa $(\frac{k}{D_t}) = 1.2E-02$ ($\frac{k}{D_t} > 10^{-2}$), sehingga nilai koefisien *drag* umum untuk aliran *steady* ($C_D^0(k/D)$) = 1.05.

b) Faktor koreksi untuk pengaruh aliran tidak *steady*

Nilai Keulegan-Carpenter (KC) = 7.892 ($5 < KC < 40$) dan nilai rasio aliran (α) = 0.2781 ($\alpha \leq 0.5$), sehingga faktor koreksi untuk pengaruh aliran tidak *steady* adalah:

$$\psi_{KC,\alpha}^{CD} = 0.85 + \frac{6}{KC} - \frac{\alpha}{2} = 1.507$$

c) Faktor koreksi untuk pengaruh letak pipa dekat dengan dasar laut

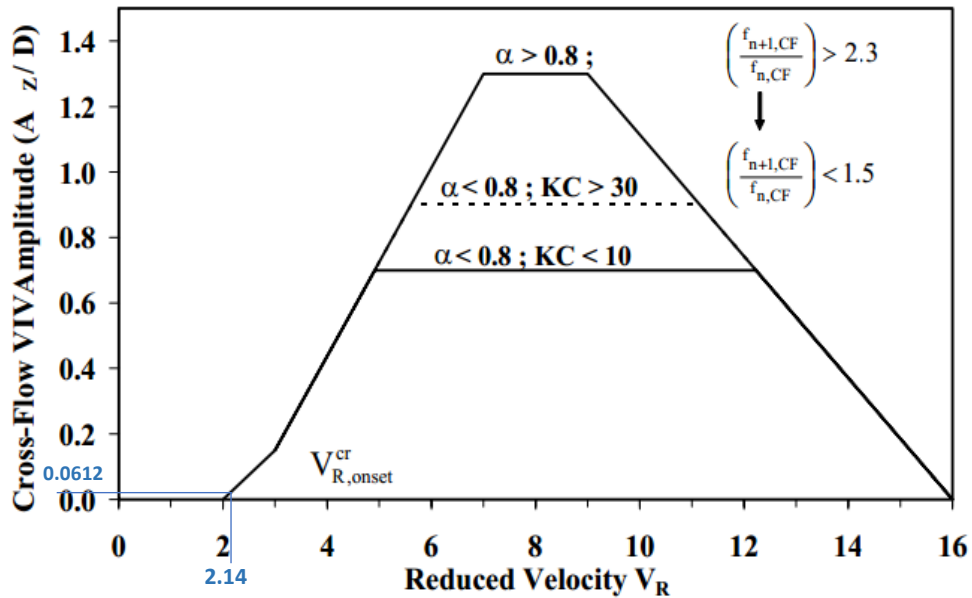
Nilai perbandingan antara *gap* dan diameter total pipa ($\frac{e}{D_t}$) = 3.596 (≥ 0.8), sehingga faktor koreksi untuk pengaruh letak pipa dekat dengan dasar laut (ψ_{proxi}^{CD}) = 1.

d) Faktor koreksi untuk keberadaan *trench*

$$\psi_{trench}^{CD} = 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{\Delta}{D_t} \right) = 1$$

e) Faktor koreksi untuk pengaruh gerakan *cross-flow*

Nilai amplitudo normal VIV arah *cross-flow* didapat melalui grafik di bawah ini dengan nilai $V_{R,onset}^{CF} = 2.143$:



Gambar E.1 Faktor koreksi untuk pengaruh gerakan *cross-flow*

Sehingga faktor tambahan karena pipa mengalami getaran *cross-flow* adalah:

$$\psi_{VIV}^{CD} = 1 + 1.043 \left(\sqrt{2} \frac{A_z}{D_t} \right)^{0.65} = 1.213$$

Koefisien gaya *drag* dihitung menggunakan persamaan 2.45 dengan parameter yang sudah dihitung sebelumnya, maka:

$$C_D = C_D^0(k/D) \cdot \psi_{KC,\alpha}^{CD} \cdot \psi_{proxi}^{CD} \cdot \psi_{trench}^{CD} \cdot \psi_{VIV}^{CD} = 1.918$$

2. Menghitung gaya *drag*

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w D_t C_D U_{tot}^2$$

Tabel E.2 Perhitungan gaya *drag*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien <i>drag</i>	C_D	1.918	-
Kecepatan arus total	U_{tot}	2.081	m/s
Total diameter luar pipa	D_t	0.2781	m
Massa jenis air laut	ρ_w	1025	kg/m ³
Gaya <i>Drag</i>	F_D	1184.385	N/m

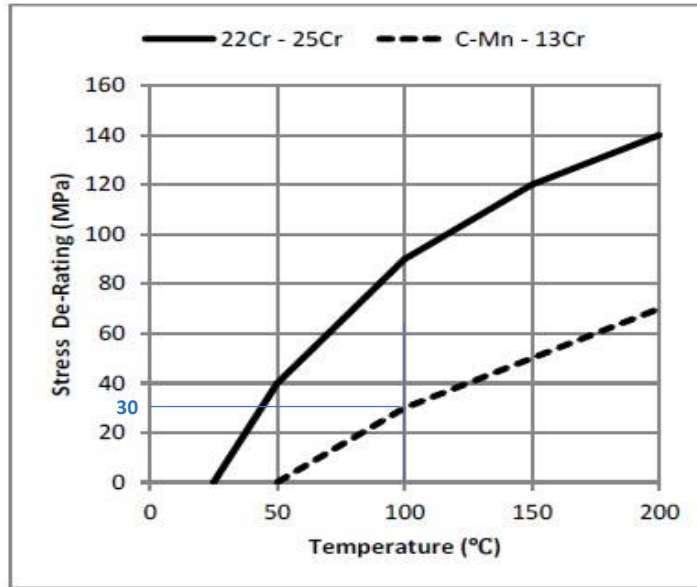
LAMPIRAN F

PARAMETER UNTUK CEK ULS

F. 1. Denote Plastic Capacities

1. Nilai *de-rating yield* dan *ultimate*

Temperatur yang digunakan adalah temperatur kekuatan pipa, yaitu 100°C.



Gambar F.1 Grafik Nilai *de-rating yield* dan *ultimate*

2. Faktor tekanan untuk beban kombinasi

Tekanan internal (P_i) = 4.31E+06 Pa

Tekanan eksternal (P_e) = 6.04E+05 Pa

Tekanan bursting (P_b) = 4.11E+07 Pa

Nilai $\left(\frac{P_i - P_e}{P_b}\right)$ merupakan parameter untuk menentukan persamaan menghitung α_p , besarnya $\frac{P_i - P_e}{P_b} = 9.03\text{E-}02 \left(< \frac{2}{3}\right)$. Sehingga faktor tekanan untuk beban kombinasi (α_p) = 0.551.

Tabel F.1 Faktor Kekuatan Material

Factor	Normally	Supplementary requirement U
α_U	0.96	1.00

LAMPIRAN G

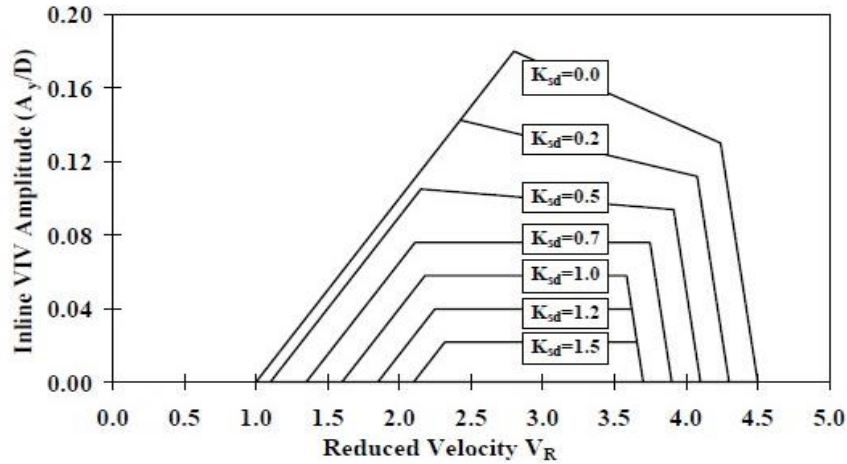
STRESS RANGE

G.1. Stress Range Arah In-Line

a. Amplitudo respon maksimal

$$\text{Reduce velocity cross-flow } (VR_{\text{onset}}^{\text{IL}}) = 0.755$$

$$\text{Parameter stabilitas } (K_{sd}) = 0.457$$



Gambar G.1 Grafik amplitudo respon maksimal

Berdasarkan grafik pada **Gambar G.1**, nilai amplitudo respon maksimal (A_v/D) = 0.

b. Faktor koreksi dari rasio aliran arus

Faktor ini bergantung pada nilai *current flow ratio* (α) = 0.207 ($\alpha < 0.5$), sehingga nilai faktor koreksi dari rasio aliran arus ($\psi_{\alpha, IL}$) = 0.

Sehingga, nilai *stress range* pada *in-line* VIV adalah:

$$S_{IL} = 2 \cdot A_{IL} \cdot (A_v/D) \cdot \psi_{\alpha, IL} \cdot \gamma_s = 0 \text{ Pa}$$

G.2. Stress Range Arah Cross-Flow

Nilai amplitudo *cross-flow* VIV telah dihitung pada perhitungan parameter gaya *drag* (A_z/D) = 0.061. Sedangkan nilai amplitudo faktor reduksi untuk *damping* dipengaruhi oleh nilai parameter stabilitas ($K_{sd} = 0.457$). Sehingga nilai amplitudo faktor reduksi untuk *damping* (R_k):

$$R_k = 1 - 0,15K_{sd} = 0.931$$

LAMPIRAN H

BENDING MOMENT

H.1. Bending Moment Arah Vertikal

1. *Bending moment* akibat beban fungsional (berat terendam pipa)

$$M_F = \frac{W_{sub} L^2}{8}$$

Tabel H.1 Perhitungan *bending moment* akibat beban fungsional

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Beban defleksi yang diterima	q (W_{sub})	4616.539	N
Panjang <i>freespan</i> aktual	L	7	m
<i>Bending moment</i> akibat beban fungsional	M_F	28276.299	Nm

2. *Bending moment* gerakan *cross-flow*

$$M_E = \sigma_E \frac{2I_{steel}}{D_0 - t_{nom}}$$

Tabel H.2 Perhitungan *bending moment* gerakan *cross-flow*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Momen inersia <i>steel</i>	I_{steel}	4.404E-05	m ⁴
Diameter luar pipa nominal	D_0	0.2191	m
Tebal nominal pipa	t_{nom}	0.0127	m
<i>Environmental stress cross-flow</i>	$\sigma_{E,CF}$	1.07E+08	Pa
<i>Bending moment cross-flow</i>	$M_{E(CF)}$	45779.886	Nm

H.2. Bending Moment Arah Horizontal

$$M_E = \sigma_E \frac{2I_{steel}}{D_0 - t_{nom}}$$

Bending moment in-line ($M_{E(IL)}$) = 25725.994 Nm

H.3. Bending Moment Total

1. Faktor akibat beban kombinasi

a. Faktor kondisi beban

Tabel H.3 Faktor kondisi beban menurut DNV-OS-F101 (2013)

Condition	γ_c
Pipeline resting on uneven seabed	1.07
Reeling on and J-tube pull-in	0.82
System pressure test	0.93
Otherwise	1.00

b. Faktor pembebanan untuk kondisi beban

Tabel H.4 Faktor Pembebanan Menurut DNV-OS-F101 (2013)

Limit State / Load combination	Load effect combination		Functional loads ¹⁾	Environmental load	Interference loads	Accidental loads
			γ_F	γ_E	γ_F	γ_A
ULS	a	System check ²⁾	1.2	0.7		
	b	Local check	1.1	1.3	1.1	
FLS	c		1.0	1.0	1.0	
ALS	d		1.0	1.0	1.0	1.0

1) If the functional load effect reduces the combined load effects, γ_F shall be taken as 1/1.1.
2) This load effect factor combination shall only be checked when system effects are present, i.e. when the major part of the pipeline is exposed to the same functional load. This will typically only apply to pipeline installation.

2. Desain effective axial force

$$S_{sd} = S_{eff} \gamma_F \gamma_c$$

Tabel H.5 Perhitungan desain effective axial force

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Gaya aksial efektif	S_{eff}	-43677.95	N
Faktor pembebanan beban fungsional	γ_F	1.1	-
Faktor pengaruh kondisi beban	γ_c	1.07	-
Desain effective axial force	S_{sd}	-51408.95	N

LAMPIRAN I

CEK ULS

I.1. Faktor Tahanan Material

Tabel I.1 Faktor tahanan material menurut DNV OS F101 (2013)

<i>Limit state category¹⁾</i>	<i>SLS/ULS/ALS</i>	<i>FLS</i>
γ_m	1.15	1.00

1) The limit states (SLS, ULS, ALS and FLS) are defined in D.

I.2. Faktor Keamanan *Resistance*

Tabel I.2 Faktor keamanan *resistance* menurut DNV OS F101 (2013)

<i>Safety class</i>	<i>γ_{sc}</i>		
	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>
Pressure containment ¹⁾	1.046 ^{2),3)}	1.138	1.308 ⁴⁾
Other	1.04	1.14	1.26

1) The number of significant digits is given in order to comply with the ISO usage factors.
2) Safety class low will be governed by the system pressure test which is required to be 3% above the incidental pressure. Hence, for operation in safety class low, the resistance factor will effectively be minimum 3% higher.
3) For system pressure test, α_t shall be equal to 1.00, which gives an allowable hoop stress of 96% of SMYS both for materials fulfilling supplementary requirement U and those not.
4) For parts of pipelines in location class 1, resistance safety class medium may be applied (1.138).

I.3. Cek ULS

Sesuai dengan DNV-OS-F101 (2013), ada dua kriteria untuk memilih persamaan cek kondisi ULS:

Ketebalan dinding pipa	(t_2)	= 0.0112	m
Diameter luar pipa nominal	(D_0)	= 0.219	m
Tekanan internal	(P_i)	= 4.31E+06	Pa
Tekanan eksternal	(P_e)	= 6.04E+05	Pa

Nilai perbandingan diameter luar pipa nominal dan ketebalan dinding pipa ($\frac{D_0}{t_2}$) adalah 19.56 dan nilai tekanan internal lebih besar dari tekanan eksternal. Nilai tersebut memenuhi kriteria persamaan 2.99:

$$15 \leq \frac{D_0}{t_2} \leq 45; P_i > P_e$$

$$\left\{ \gamma_m \gamma_{sc} \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \gamma_{sc} S_{sd}(P_i)}{\alpha_c S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \frac{P_i - P_e}{\alpha_c P_b(t_2)} \right)^2 \leq 1$$

1. Panjang *span* = 7 meter

Tabel I.3 Cek kondisi ULS dengan panjang *span* = 7 meter

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Faktor tahanan material	γ_m	1.150	-
Faktor keamanan <i>resistance</i>	γ_{sc}	1.138	-
Parameter aliran tegangan	α_c	1.136	-
Faktor tekanan untuk beban kombinasi	α_p	0.551	-
Plastic moment resistance	M_p	1.598E+05	Nm
Plastic axial force resistance	S_p	2.414E+06	N
Desain effective axial force	S_{Sd}	-5.141E+04	N
Resultan bending moment	M_{Sd}	9.86E+04	Nm
Tekanan internal	P_i	4.310	Mpa
Tekanan eksternal	P_e	0.604	Mpa
Tekanan bursting	P_b	41.056	Mpa
<i>Unity Check</i>	UC	0.55	OK

2. Panjang *span* = 7.5 meter

Tabel I.4 Pengecekan ULS dengan Panjang *span* = 7.5 meter

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Faktor tahanan material	γ_m	1.150	-
Faktor keamanan <i>resistance</i>	γ_{sc}	1.138	-
Parameter aliran tegangan	α_c	1.136	-
Faktor tekanan untuk beban kombinasi	α_p	0.551	-
Plastic moment resistance	M_p	1.598E+05	Nm
Plastic axial force resistance	S_p	2.414E+06	N
Desain effective axial force	S_{Sd}	-5.14E+04	N
Resultan bending moment	M_{Sd}	1.06E+05	Nm
Tekanan internal	P_i	4.31	Mpa
Tekanan eksternal	P_e	0.604	Mpa
Tekanan bursting	P_b	41.056	Mpa
<i>Unity Check</i>	UC	0.63	OK

LAMPIRAN J

TEGANGAN *VON-MISES* DAN PANJANG *SPAN* YANG DIIZINKAN

J.1. Tegangan *Von-mises*

a) *Hoop Stress*

$$\sigma_h = (P_i - P_e) \frac{D_o - t_2}{2t_2}$$

Tabel J.1 *Hoop Stress*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tekanan internal	P _i	4.31E+06	Pa
Tekanan eksternal	P _e	6.04E+05	Pa
Diameter luar pipa nominal	D ₀	0.2191	m
Ketebalan dinding pipa	t ₂	0.0112	m
<i>Hoop stress</i>	σ _h	3.44E+07	Pa

b) *Thermal Stress*

$$\sigma_T = -E\alpha_e\Delta T$$

Tabel J.2 *Thermal Stress*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Modulus Young <i>steel</i>	E	2.07E+11	Pa
Koefisien <i>temperature expansion</i>	α _e	1.17E-05	/°C
Perbedaan temperatur	ΔT	40	°C
<i>Thermal stress</i>	σ _T	-9.69E+07	Pa

c) *Poisson Stress*

$$\sigma_p = \nu\sigma_h$$

Tabel J.3 *Poisson Stress*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Poisson's ratio</i>	ν	0.3	-
<i>Hoop stress</i>	σ _h	3.44E+07	Pa
<i>Poisson stress</i>	σ _p	1.03E+07	Pa

d) *Bending Stress*

$$\sigma_b = \frac{M_{Sd} D_0}{2I_{steel}}$$

Tabel J.4 *Bending stress*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Resultan bending moment</i>	M_{Sd}	9.86E+04	Nm
Diameter luar pipa nominal	D_0	2.19E-01	m
Momen inersia steel	I_{steel}	4.40E-05	m ⁴
<i>Bending stress</i>	σ_b	2.45E+08	Pa

e) *Longitudinal Stress*

$$\sigma_L = \sigma_T + \sigma_p \pm \sigma_b$$

Tabel J.5 *Longitudinal stress*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Thermal stress</i>	σ_T	-9.69E+07	Pa
<i>Poisson stress</i>	σ_p	1.03E+07	Pa
<i>Bending stress</i>	σ_b	2.45E+08	Pa
<i>Longitudinal stress</i>	σ_L	1.59E+08	Pa

Hasil dari perhitungan *von-mises* adalah sebagai berikut:

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - \sigma_h \cdot \sigma_L + 3 \cdot \tau_x^2}$$

Tabel J.6 Kesimpulan perhitungan *von-mises*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Longitudinal stress</i>	σ_L	1.59E+08	Pa
<i>Hoop stress</i>	σ_h	3.44E+07	Pa
<i>Tangential shear stress</i>	τ	0	Pa
<i>Equivalent stress (manual)</i>	σ_{eq}	1.45E+08	Pa
<i>Equivalent stress (software)</i>		1.49E+08	

J.2. Tegangan Buckling Kritis

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E I_{steel}}{A_s L^2}$$

Tabel J.7 Tegangan *Buckling* Kritis

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Modulus Young <i>steel</i>	E	2.07E+11	Pa
Panjang <i>freespan</i> aktual	L	7	m
Momen inersia <i>steel</i>	I _{steel}	4.40E-05	m ⁴
Area <i>steel</i>	A _s	8.23E-03	m ²
Tegangan <i>Buckling</i> Kritis	σ_{cr}	2.23E+08	Pa

J.3. Perbandingan Tegangan *Von-Mises* dengan *Buckling* ($\sigma_{eq} < \sigma_{cr}$)**Tabel J.8** Perbandingan Tegangan *Von-Mises* dengan *Buckling*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Panjang <i>freespan</i>	L	7	m
<i>Equivalent stress</i> (manual)	σ_{eq}	1.45E+08	Pa
<i>Equivalent stress</i> (software)		1.49E+08	
Tegangan <i>Buckling</i> Kritis	σ_{cr}	2.23E+08	Pa
Cek		Pass	

J.4. Panjang *Span* yang Diizinkan

Panjang *freespan* yang diizinkan didapatkan dengan membandingkan hasil *screening* frekuensi natural pipa dan cek ULS yang telah disertai dengan cek tegangan. **Tabel J.9** berikut merupakan hasil untuk mengetahui panjang *span* maksimal untuk cek kondisi ULS. Hasil “OK” merupakan panjang *span* yang memiliki nilai UC kurang dari satu dan nilai tegangan ekuivalen kurang dari nilai tegangan *buckling* kritis.

Tabel J.9 Panjang *span* maksimal kondisi ULS

Panjang <i>Span</i>	UC	σ_{eq}	σ_{cr}	Cek
7	0.55	1.45E+08	2.23E+08	OK
7.5	0.63	1.62E+08	1.94E+08	OK
8	0.72	1.83E+08	1.71E+08	NOT OK
11.5	2.33	4.19E+08	8.26E+07	NOT OK

Setelah panjang *span* maksimal merupakan panjang *span* paling pendek dari tiap – tiap cek yang telah dilakukan. **Tabel J.10** merupakan perbandingan dari

panjang *span* maksimal yang diizinkan dan kolom hasil merupakan panjang maksimal *freespan* yang digunakan.

Tabel J.10 Panjang *freespan* yang diizinkan

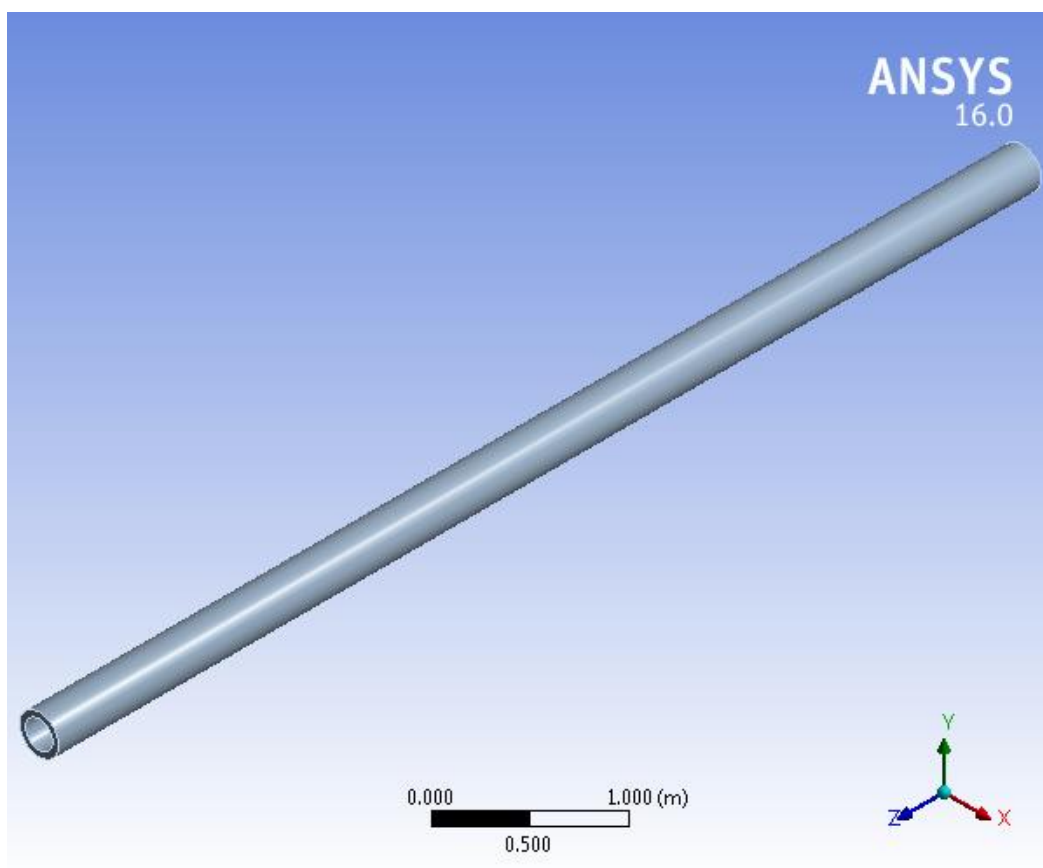
Parameter	Screening frekuensi natural		Cek ULS	Hasil
	<i>in-line</i>	<i>cross-flow</i>		
L (m)	7	11.5	7.5	7

LAMPIRAN K
TEGANGAN EKVIVALEN MENGGUNAKAN *SOFTWARE*



Project

First Saved	Sunday, June 03, 2018
Last Saved	Thursday, July 19, 2018
Product Version	16.0 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



Contents

- [Units](#)
- [Model \(A4\)](#)
 - [Geometry](#)
 - [Solid](#)
 - [Coordinate Systems](#)
 - [Mesh](#)
 - [Named Selections](#)
 - [Static Structural \(A5\)](#)
 - [Analysis Settings](#)
 - [Loads](#)
 - [Solution \(A6\)](#)
 - [Solution Information](#)
 - [Equivalent Stress](#)
- [Material Data](#)
 - [Structural Steel](#)

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (A4)

Geometry

TABLE 2
Model (A4) > Geometry

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
Definition	
Source	D:\TA NONNNNIA\baru\baru mesh 0.5_files\dp0\SYS\DM\SYS.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	0.2781 m
Length Y	0.2781 m
Length Z	7. m
Properties	
Volume	0.21892 m ³
Mass	1718.5 kg
Scale Factor Value	1.
Statistics	
Bodies	1

Active Bodies	1
Nodes	106912
Elements	19392
Mesh Metric	None
Basic Geometry Options	
Parameters	Yes
Parameter Key	DS
Attributes	No
Named Selections	No
Material Properties	No
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	No
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	No
Compare Parts On Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\freeuser\AppData\Roaming\Ansys\v160
Analysis Type	3-D
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (A4) > Geometry > Parts

Object Name	<i>Solid</i>
State	Meshed
Graphics Properties	
Visible	Yes
Transparency	1
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Length X	0.2781 m
Length Y	0.2781 m
Length Z	7. m
Properties	
Volume	0.21892 m ³
Mass	1718.5 kg
Centroid X	1.6592e-018 m
Centroid Y	1.0785e-018 m

Centroid Z	3.5 m
Moment of Inertia Ip1	6994. kg·m ²
Moment of Inertia Ip2	6994. kg·m ²
Moment of Inertia Ip3	24.424 kg·m ²
Statistics	
Nodes	106912
Elements	19392
Mesh Metric	None

Coordinate Systems

TABLE 4
Model (A4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	<i>Global Coordinate System</i>
State	Fully Defined
Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System ID	0.
Origin	
Origin X	0. m
Origin Y	0. m
Origin Z	0. m
Directional Vectors	
X Axis Data	[1. 0. 0.]
Y Axis Data	[0. 1. 0.]
Z Axis Data	[0. 0. 1.]

Mesh

TABLE 5
Model (A4) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Coarse
Element Size	1.0 m
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Fine
Minimum Edge Length	0.608530 m
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272

Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Patch Independent Options	
Topology Checking	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
Statistics	
Nodes	106912
Elements	19392
Mesh Metric	None

Named Selections

Static Structural (A5)

TABLE 6
Model (A4) > Analysis

Object Name	<i>Static Structural (A5)</i>
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	25. °C
Generate Input Only	No

TABLE 7
Model (A4) > Static Structural (A5) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Restart Analysis	
Restart Type	Program Controlled
Status	Done
Step Controls	

Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	50.
Minimum Substeps	50.
Maximum Substeps	1000.
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	Yes
Nonlinear Controls	
Newton-Raphson Option	Program Controlled
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	No
Contact Miscellaneous	No
General Miscellaneous	No
Store Results At	All Time Points
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	D:\TA NONNNNIA\baru\baru mesh 0.5_files\dp0\SYS\MECH\
Future Analysis	Prestressed analysis
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	Yes
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mks

FIGURE 1
Model (A4) > Static Structural (A5) > Figure

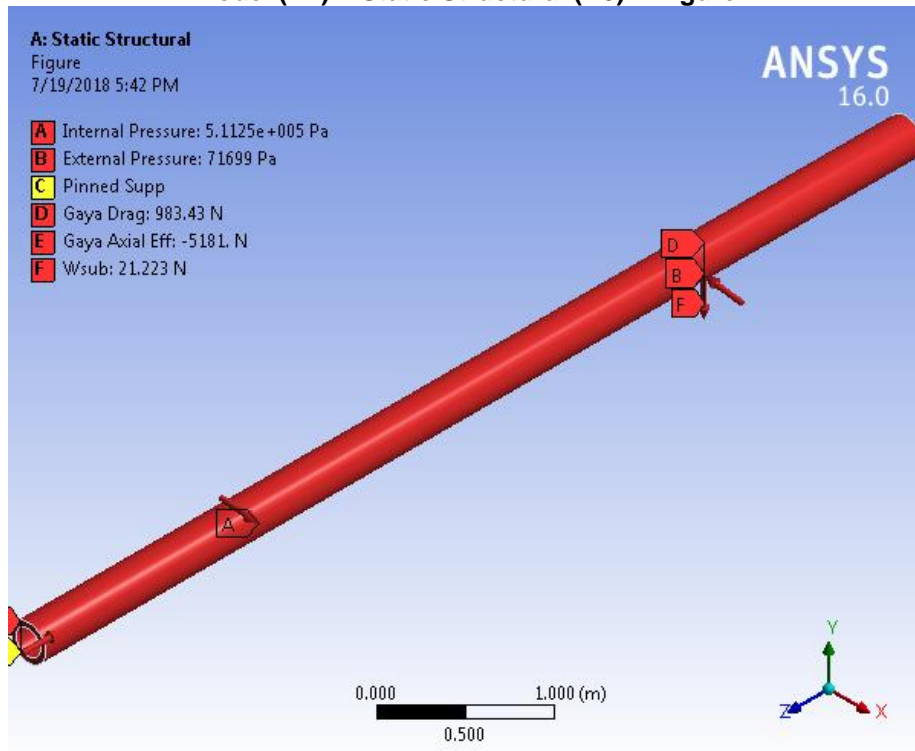


TABLE 8
Model (A4) > Static Structural (A5) > Loads

Object Name	Internal Pressure	External Pressure	Pinned Supp	Gaya Drag	Gaya Axial Eff	Thermal Condition	Wsub
State	Fully Defined						
Scope							
Scoping Method	Geometry Selection						
Geometry	1 Face		2 Faces	1 Face		1 Body	4 Faces
Definition							
Type	Pressure		Displacement	Force		Thermal Condition	Force
Define By	Normal To		Components		Vector		Components
Magnitude	4.31e+006 Pa (ramped)	6.0445e+005 Pa (ramped)			-43678 N (ramped)	65. °C (ramped)	
Suppressed	No						
Coordinate System			Global Coordinate System				Global Coordinate System
X Component			0. m (ramped)	-8290.7 N			0. N (ramped)

			(ramped)		
Y Component		0. m (ramped)	0. N (ramped)		-178.92 N (ramped)
Z Component		0. m (ramped)	0. N (ramped)		0. N (ramped)
Direction				Defined	

FIGURE 2
Model (A4) > Static Structural (A5) > Internal Pressure

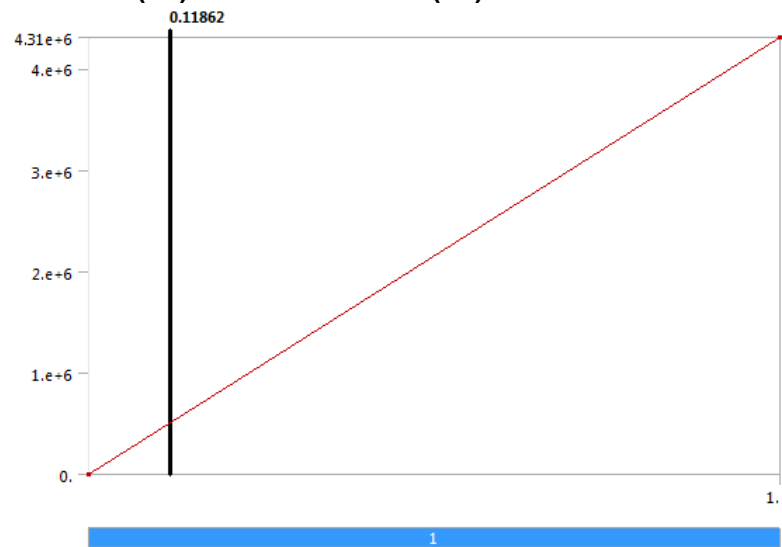


FIGURE 3
Model (A4) > Static Structural (A5) > External Pressure

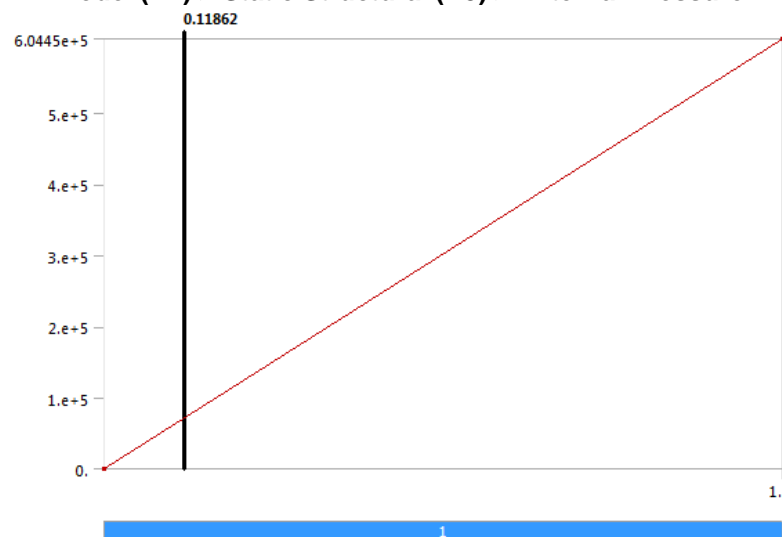


FIGURE 4
Model (A4) > Static Structural (A5) > Pinned Supp

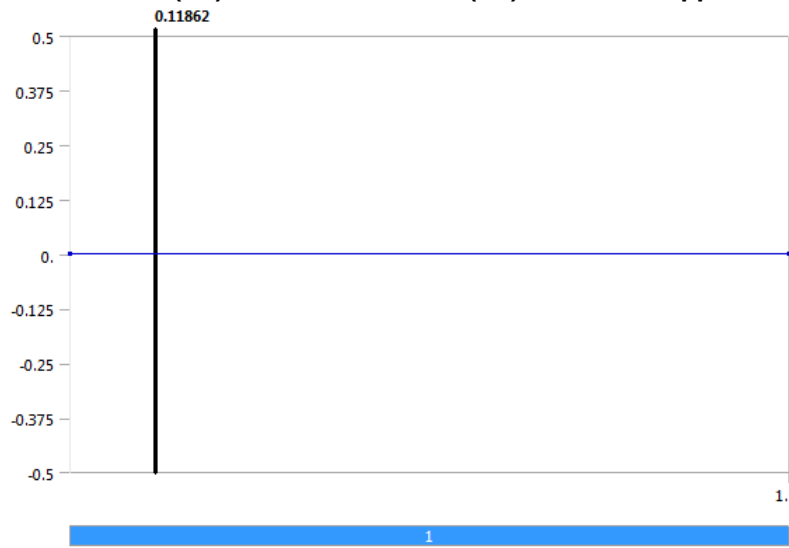


FIGURE 5
Model (A4) > Static Structural (A5) > Gaya Drag

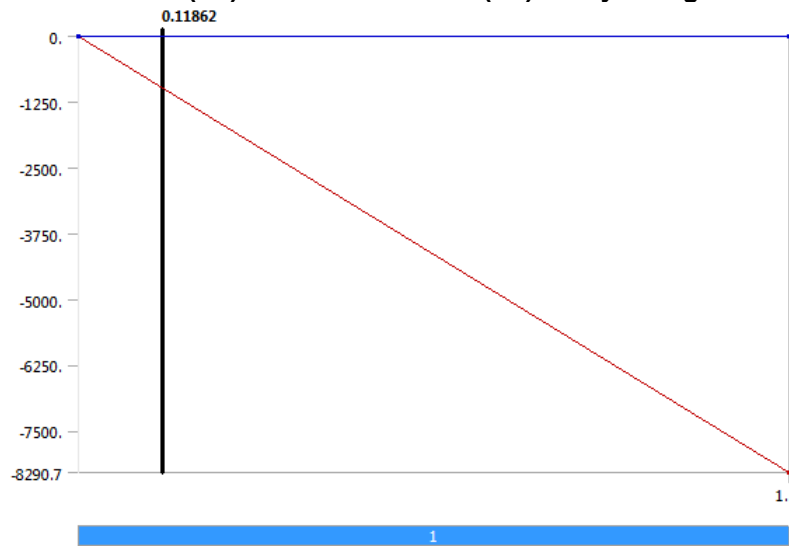


FIGURE 6
Model (A4) > Static Structural (A5) > Gaya Axial Eff

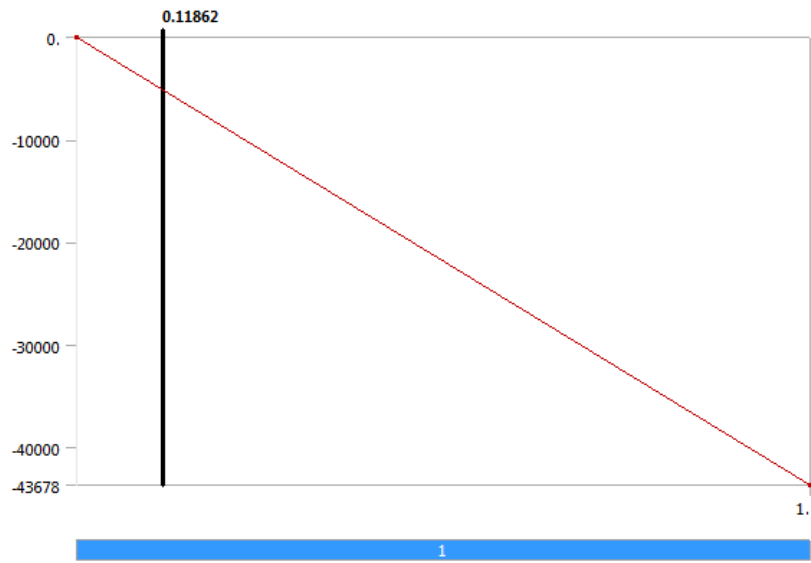
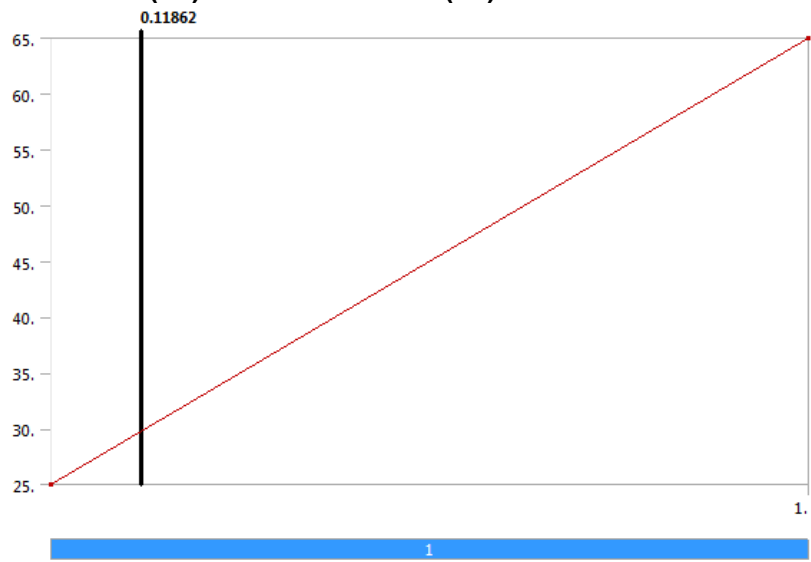
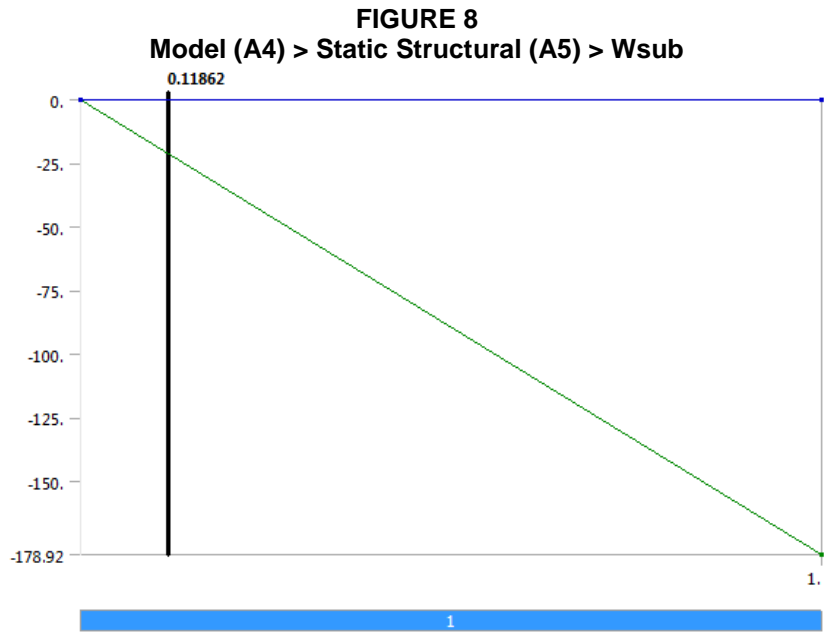


FIGURE 7
Model (A4) > Static Structural (A5) > Thermal Condition





Solution (A6)

TABLE 9
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution

Object Name	<i>Solution (A6)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1.
Refinement Depth	2.
Information	
Status	Done
Post Processing	
Calculate Beam Section Results	No

TABLE 10
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Force Convergence
Newton-Raphson Residuals	0
Update Interval	2.5 s
Display Points	All
FE Connection Visibility	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

FIGURE 9
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

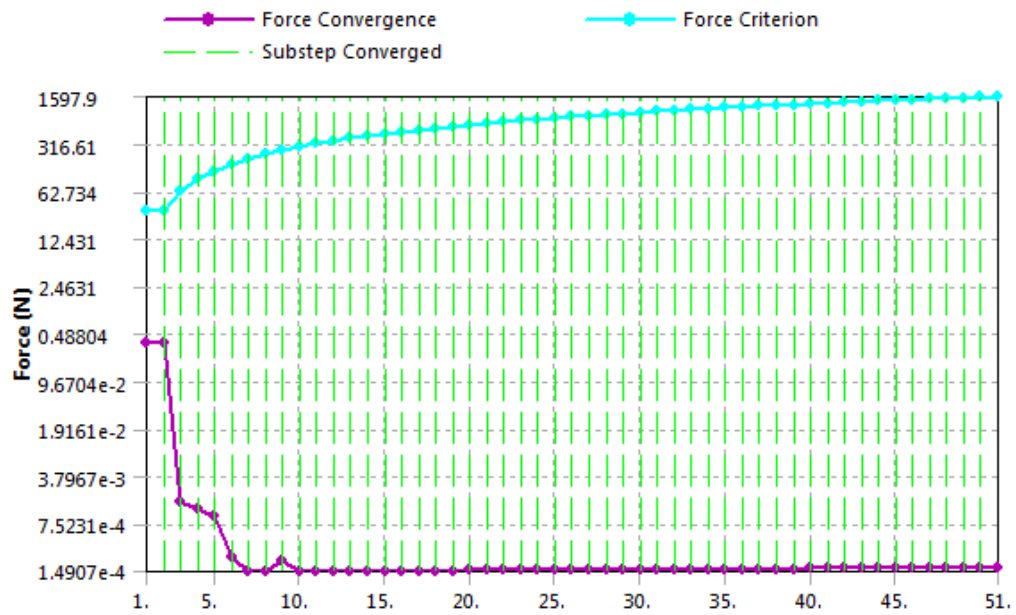


FIGURE 10
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

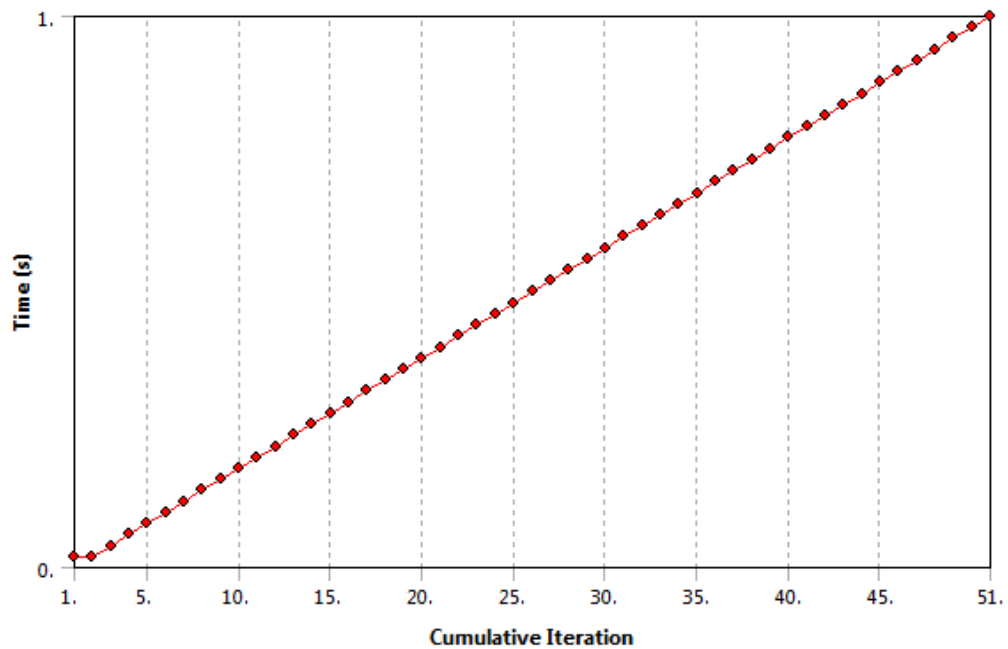


TABLE 11
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results

Object Name	<i>Equivalent Stress</i>
State	Solved
Scope	

Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Maximum Over Time
Identifier	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	Yes
Results	
Minimum	1.8923e+007 Pa
Maximum	1.4933e+008 Pa

Material Data

Structural Steel

TABLE 12
Structural Steel > Constants

Density	7850 kg m ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1.2e-005 C ⁻¹
Specific Heat	434 J kg ⁻¹ C ⁻¹
Thermal Conductivity	60.5 W m ⁻¹ C ⁻¹
Resistivity	1.7e-007 ohm m

TABLE 13
Structural Steel > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength Pa
0

TABLE 14
Structural Steel > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength Pa
2.5e+008

TABLE 15
Structural Steel > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength Pa
2.5e+008

TABLE 16
Structural Steel > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength Pa
4.6e+008

TABLE 17
Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

Reference Temperature C
22

TABLE 18
Structural Steel > Alternating Stress Mean Stress

Alternating Stress Pa	Cycles	Mean Stress Pa
3.999e+009	10	0
2.827e+009	20	0
1.896e+009	50	0
1.413e+009	100	0
1.069e+009	200	0
4.41e+008	2000	0
2.62e+008	10000	0
2.14e+008	20000	0
1.38e+008	1.e+005	0
1.14e+008	2.e+005	0
8.62e+007	1.e+006	0

TABLE 19
Structural Steel > Strain-Life Parameters

Strength Coefficient Pa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient Pa	Cyclic Strain Hardening Exponent
9.2e+008	-0.106	0.213	-0.47	1.e+009	0.2

TABLE 20
Structural Steel > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa
	2.e+011	0.3	1.6667e+011	7.6923e+010

TABLE 21
Structural Steel > Isotropic Relative Permeability

Relative Permeability
10000

BIODATA PENULIS



Nonnia Dewi Permata Lomantoro lahir di Pasuruan pada tanggal 10 November 1996. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis menjalani pendidikan formal SD selama 6 tahun di SDN Gambiran I Prigen-Pasuruan, kemudian melanjutkan pendidikan di SMPN 2 Pandaan-Pasuruan dan SMAN 1 Pandaan-Pasuruan. Setelah lulus pada tahun 2014, penulis mengikuti Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) dan diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan ITS Surabaya dengan NRP 04311440000067. Selama menempuh masa perkuliahan, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan sebagai Staff Departemen Dalam Negeri pada periode 2015-2016 dan berlanjut sampai periode 2016-2017 sebagai Staff Ahli Departemen Dalam Negeri. Pada Juli-Agustus 2017, penulis melakukan Kerja Praktek di PT. Tripatra dan mendapat wawasan yang luas mengenai pemodelan serta analisis *in-place* dan *lifting* struktur *topside*. Pada akhir masa pendidikan, penulis memilih topik tugas akhir tentang kekuatan struktur pipa bawah laut yang mengalami *freespan*.

Kontak Penulis

Email : nonniadpl@gmail.com